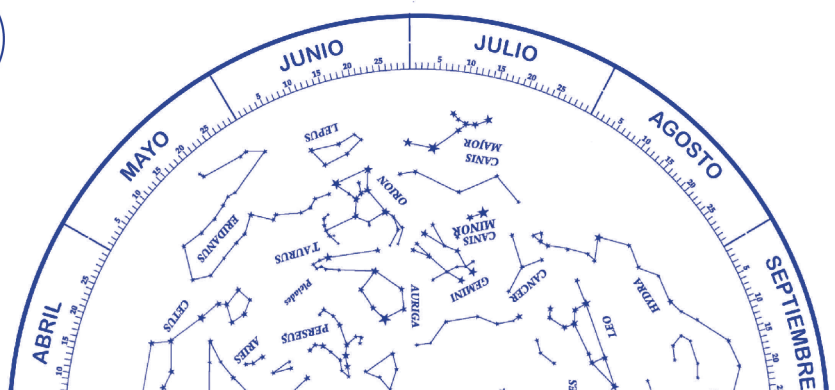
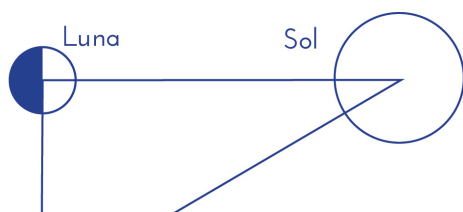
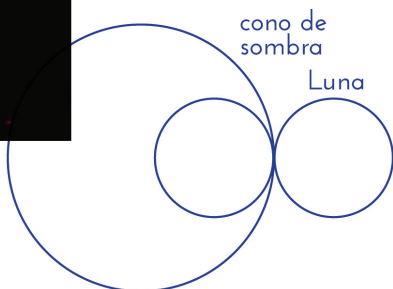
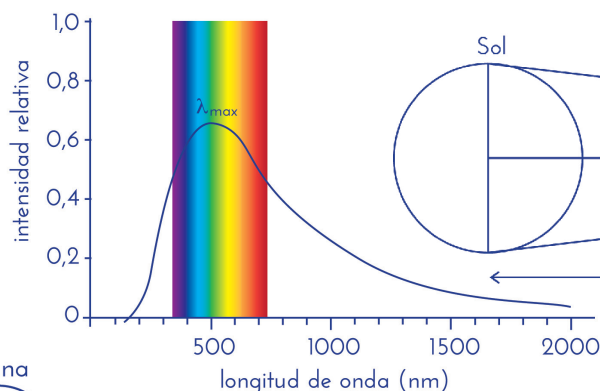
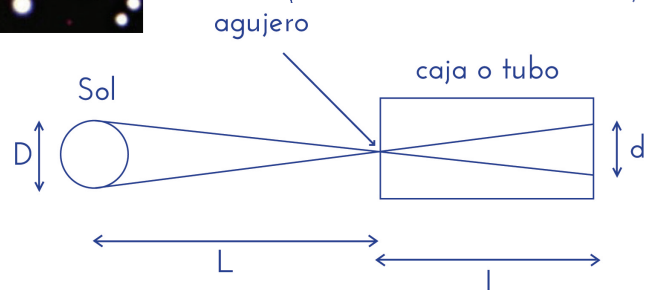


14 pasos hacia el Universo

Curso de Astronomía para profesores y posgraduados de ciencias

Red para la educación astronómica en la escuela NASE
Unión Astronómica Internacional UAI

Editoras: Rosa M. Ros
y Beatriz García



14 pasos hacia el Universo

Curso de Astronomía para profesores y posgraduados de ciencias

Red para la educación astronómica en la escuela NASE

Unión Astronómica Internacional UAI

Editoras: Rosa M. Ros y Beatriz García



Segunda edición: diciembre 2017

©: NASE 2017-12-15

©: Francis Berthomieu, Juan Antonio Belmonte, Alexandre da Costa, Hans Deeg, Susana Deustua, Julieta Fierro, Beatriz García, Mary Kay Hemenway, Ricardo Moreno, Jay M. Pasachoff, John Percy, Rosa M. Ros y Magda Stavinschi, 2016 por el texto

Edición: Rosa M. Ros y Beatriz García

Revisión, y adaptación de la 2ª edición: Ederlinda Viñuales

Diseño Gráfico: Maria Vidal

Impreso en la UE

ISBN: 978-84-15771-45-6

Esta edición ha sido financiada por la
SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA



Índice

Introducción	7
Evolución de las Estrellas	8
Cosmología	18
Historia de la Astronomía	24
Sistema Solar	36
Horizonte local y Relojes de Sol	52
Simuladores del movimiento estelar, solar y lunar	66
Sistema Tierra-Luna-sol: Fases y eclipses	84
Maletín del joven astrónomo	94
Espectro solar y manchas solares	106
Vida de las estrellas	116
Astronomía fuera de lo visible	128
Explosión de Universo	138
Planetas y exoplanetas	150
Preparación de Observaciones	166
La Arqueoastronomía y su potencial educativo	178

Introducción

Para incrementar la presencia de la astronomía en las escuelas es fundamental la formación del profesorado. NASE tiene por objetivo principal el desarrollo de cursos de formación de calidad en todos los países interesados por desarrollar la astronomía en diferentes niveles de educación, incorporar temas vinculados con la disciplina en distintos espacios curriculares o introducir a los jóvenes en las ciencias a través de aproximaciones al estudio del Universo. Estos cursos tratan sobre 14 acciones (entre conferencias y talleres) que son el comienzo del camino de formación de los profesores en astronomía. Estos 14 pasos iniciales hacia el conocimiento del Universo se compilan en esta publicación fruto del trabajo de un buen número de astrónomos profesionales y profesores que han desarrollado los cursos a lo largo de varios años, cursos que también pueden encontrar en la página web de NASE.

Hay que destacar que en todas las actividades propuestas se potencia la participación activa, la observación, y si es el caso, la realización de modelos que permitan comprender mejor los contenidos científicos. Todas las escuelas tienen un patio, se propone usar este patio como “laboratorio de astronomía” para poder realizar observaciones y hacer que los estudiantes sean los grandes protagonistas en la tarea de aprender.

Queremos agradecer a todos los autores su colaboración en la preparación de los materiales. También destacar la gran ayuda recibida para realizar traducciones y contrastar las dos versiones de este libro (español/inglés), así como preparar y revisar figuras y gráficos a: Ligia Arias, Barbara Castanheira, Lara Eakins, Jaime Fabregat, Keely Finkelstein, Irina Marinova, Néstor Marinozzi, Erin Mentuch Cooper, Isa Oliveira, Cristina Padilla, Silvina Pérez Álvarez, Claudia Romagnolli, Colette Salyk, Viviana Sebben, Oriol Serrano, Rubén Trillo, Sarah Tuttle y Ederlinda Viñuales.

Para saber más acerca de los cursos desarrollados hasta ahora, de las actividades y nuevos cursos que han surgido después del curso inicial, invitamos al lector a dirigirse a la página web de NASE. El programa no se limita a dar cursos de formación sino que tras varias actuaciones consigue formar un grupo de trabajo con profesores del lugar que es el que después mantiene la llama encendida, crea más materiales y nuevas actividades, disponibles íntegramente en la web.

En la web también se puede encontrar gran cantidad de materiales complementarios que ofrecen un universo de posibilidades al profesor que ha seguido los cursos de NASE, para poder ampliar sus conocimientos y las actividades a realizar en su centro.

Finalizaremos esta presentación con una frase de Confucio (551 a. C. - 479 a. C) que se ajusta muy bien al proyecto y a sus objetivos:

Lo escuché y lo olvidé,
Lo vi y lo recordé,
Lo hice y lo comprendí

El objetivo primordial de NASE es hacer astronomía entre todos para entender y disfrutar con el proceso de asimilación de nuevos conocimientos.

Evolución de las estrellas

John Percy

International Astronomical Union, Universidad de Toronto (Canadá)

Resumen

Este artículo contiene información acerca de las estrellas y la evolución estelar, que puede ser útil para los profesores de Física en la escuela secundaria. También incluye enlaces a páginas que abordan temas del currículo de ciencias típico.

Objetivos

- Comprender la evolución estelar y los procesos que la determinan.
- Comprender el diagrama de Hertzsprung-Russell.
- Comprender el concepto de magnitud absoluta y aparente.

Introducción

La evolución estelar trata sobre los cambios que se producen en las estrellas hasta su muerte. La gravedad obliga a las estrellas a irradiar energía. Para equilibrar esta pérdida de energía, las estrellas producen energía por la fusión nuclear de elementos más ligeros en otros más pesados. Este proceso cambia lentamente su composición química, y por lo tanto, sus otras propiedades. Con el tiempo, las estrellas agotan su combustible nuclear y mueren. Comprender la naturaleza y evolución de las estrellas nos ayuda a entender y apreciar la naturaleza y evolución de nuestro Sol, la estrella que hace posible la vida en la Tierra. Nos ayuda a entender el origen de nuestro Sistema Solar y de los átomos y moléculas de las que todo, incluyendo la vida, está hecho. Nos ayuda a responder cuestiones tan fundamentales como “¿es posible que otras estrellas produzcan suficiente energía, vivan lo suficiente y permanezcan estables el tiempo suficiente como para que la vida pueda desarrollarse y evolucionar en los planetas que las orbitan?” Por estas y otras razones, la evolución estelar es un tema interesante para los estudiantes.

Las propiedades del Sol y las estrellas

El primer paso para entender el origen y la evolución del Sol y las estrellas es entender sus propiedades. Los estudiantes deben entender cómo se determinan estas propiedades. El Sol es la estrella

más cercana y se presenta en otras conferencias de este curso. Aquí, consideramos al Sol en lo que se refiere a la evolución estelar. Los estudiantes deberían entender las propiedades, la estructura y la fuente de energía del Sol, porque los mismos principios permiten a los astrónomos determinar la estructura y evolución de todas las estrellas.

El Sol

Las propiedades básicas del Sol son relativamente fáciles de determinar, en comparación con las de otras estrellas. Su distancia media es de $1,495978715 \times 10^{11}$ m; llamamos a esto una Unidad Astronómica. A partir de ella, su radio angular observado (959,63 segundos de arco) se puede convertir, por la trigonometría, en un radio lineal: $6,96265 \times 10^8$ metros o 696.265 kilómetros. Su flujo observado (1.370 W/m^2) a la distancia de la Tierra se puede convertir en una potencia total: $3,85 \times 10^{26} \text{ W}$.

La masa se puede determinar a partir de la fuerza de atracción gravitatoria sobre los planetas, utilizando las leyes de Newton del movimiento y la gravitación: $1,9891 \times 10^{30} \text{ kg}$. La temperatura de su superficie radiante —la capa de la cual proviene su luz— es 5780 K. Su período de rotación es de aproximadamente 25 días, pero varía con la latitud en el Sol, y es casi exactamente esférico. Está formado principalmente por hidrógeno y helio.

Las estrellas

La propiedad observable más evidente de una estrella es su brillo aparente. Esto es medido como una magnitud, que es una medida logarítmica del flujo de energía (cantidad de energía por unidad de superficie) que nosotros recibimos.

La escala de magnitudes fue desarrollada por el astrónomo griego Hiparco (190-120 a.C). Clasificó las estrellas como de magnitud 1, 2, 3, 4 y 5. Esta es la razón por la cual, las estrellas más débiles tienen magnitudes más positivas. Más tarde, se constató que, debido a que nuestros sentidos reaccionan de manera logarítmica a los estímulos, había una relación fija de brillo (2.512), correspondiente a una diferencia de 1 magnitud. La estrella más brillante

en el cielo nocturno tiene una magnitud de -1,44. La estrella más tenue visible con el telescopio más grande tiene una magnitud de alrededor de 30.

El brillo aparente B de una estrella depende de su potencia P y de su distancia D , de acuerdo con la ley de la inversa del cuadrado: el brillo es directamente proporcional a la potencia e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia: $B = Cte \times P/D^2$. En las estrellas cercanas, la distancia puede ser medida por paralaje. Los estudiantes pueden hacer una demostración de la paralaje, y para demostrar que la paralaje es inversamente proporcional a la distancia del objeto observado. La potencia de las estrellas puede ser calculada a partir del brillo medido y la ley de la inversa del cuadrado de la distancia.

Diferentes estrellas tienen colores ligeramente diferentes, se puede ver esto más fácilmente buscando las estrella Rigel (Beta Orionis) y Betelgeuse (Alpha Orionis) en la constelación Orión (figura 1). Los estudiantes pueden observar las estrellas por la noche y experimentar la maravilla y la belleza del cielo real. Los colores de las estrellas se deben a las diferentes temperaturas de las capas de radiación de las estrellas, estrellas frías aparecen ligeramente enrojecidas; estrellas calientes aparecen ligeramente azules. (Es lo opuesto a los colores que vemos en los grifos de agua fría y caliente en el baño!) Esto se debe a la forma en la que nuestros ojos responden al color, una estrella roja aparece blanca rojiza, y una estrella azul aparece de color blanco azulado. El color puede ser medido con precisión usando un fotómetro con filtros de color, y la temperatura se puede determinar a partir del color.



Fig. 1: La constelación de Orión. Como se observa en el HN. Betelgeuse, la estrella de la parte superior izquierda, es fría, por lo que parece enrojecida. Deneb, la estrella inferior derecha, es caliente, por lo que parece azulada.

La temperatura de la estrella también puede determinarse a partir de su espectro -la distribución de colores o longitudes de onda en la luz de la estrella (figura 2). Esta figura ilustra la belleza de los colores de la luz de las estrellas. Esta luz ha pasado por la

atmósfera exterior de la estrella, y los iones, átomos y moléculas en la atmósfera absorben longitudes de onda específicas del espectro. Esto produce líneas oscuras, o colores que faltan en el espectro (figura 2). Dependiendo de la temperatura de la atmósfera, los átomos pueden ser ionizados, excitados, o combinados en moléculas. El estado observado de los átomos, en el espectro, proporciona información sobre la temperatura.

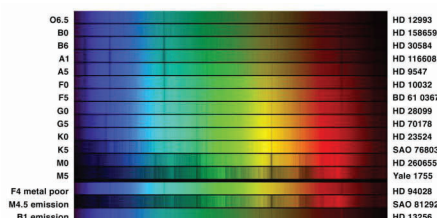


Fig. 2: Los espectros de muchas estrellas, desde la más caliente (O6.5: arriba) hasta la más fría (M5: abajo). Las diferentes apariencias de los espectros se deben a las diferentes temperaturas de las estrellas. Los tres espectros de abajo son de estrellas peculiares de alguna manera. (Fuente: Observatorio Nacional de Astronomía Óptica).

Hace un siglo, los astrónomos descubrieron una relación importante entre la potencia o la luminosidad de una estrella y su temperatura: para la mayoría (pero no todas) de las estrellas, la potencia au-

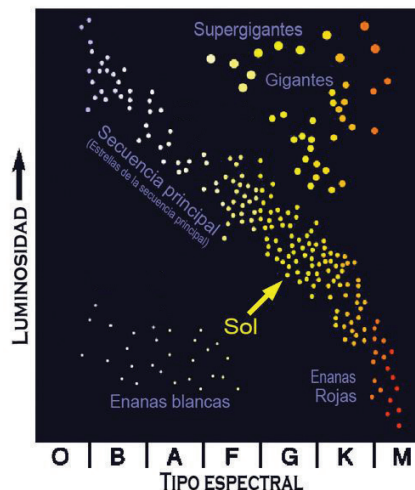


Fig. 3: Diagrama de Hertzsprung-Russell, un gráfico de la energía o la luminosidad estelar versus la temperatura. Por razones históricas, el aumento de la temperatura es hacia la izquierda. Las letras OBAFGKM son los tipos espectrales que se relacionan con la temperatura. Las líneas diagonales muestran los radios de las estrellas; las estrellas más grandes (gigantes y supergigantes) se encuentran en la parte superior derecha, las más pequeñas (enanas) se encuentran en la parte inferior izquierda. Obsérvese la secuencia principal (main sequence) desde la parte inferior derecha hasta la parte superior izquierda. La mayoría de estrellas se encuentran en esa secuencia. Se muestran las masas de las estrellas de la secuencia principal y la ubicación de algunas estrellas conocidas. (Fuente: Universidad de California Berkeley).

menta con su temperatura. Se descubrió más tarde que el factor determinante es la masa de la estrella: estrellas más masivas son más luminosas, y más calientes. Un gráfico de potencia-temperatura se llama diagrama de Hertzsprung-Russell (figura 3). Es muy importante que los estudiantes aprendan a construir gráficos de este tipo e interpretarlos.

Un objetivo importante de la astronomía es determinar la potencia de estrellas de diferentes tipos. Entonces, si ese tipo de estrellas se observa en otras partes del Universo, los astrónomos pueden usar su brillo medido "B" y su potencia asumida, P, para determinar su distancia D, a partir de la ley de la inversa del cuadrado: P/D^2 .

Los espectros de las estrellas (y de las nebulosas) también revelan de qué están hechas: la curva de abundancia cósmica (figura 4). Se componen de alrededor de $\frac{3}{4}$ de hidrógeno, $\frac{1}{4}$ helio, y el 2% de elementos más pesados, sobre todo carbono, nitrógeno y oxígeno.

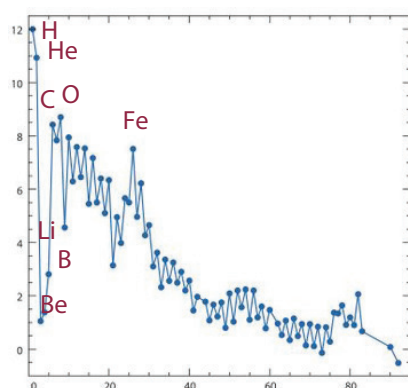


Fig. 4: La abundancia de los elementos en el Sol y las estrellas. El hidrógeno y el helio son los más abundantes. Hay muy poco litio, berilio y boro y bastante carbono, nitrógeno y oxígeno. Las abundancias de los demás elementos disminuyen considerablemente al aumentar el número atómico. El hidrógeno es 10^{12} veces más abundante que el uranio. Los elementos con número par de protones tienen una mayor abundancia que los elementos con los números impares de protones. Los elementos más ligeros que el hierro se producen por la fusión nuclear en las estrellas. Los elementos más pesados que el hierro se producen por captura de neutrones en explosiones de supernova. (Fuente: NASA).

Alrededor de la mitad de las estrellas en el espacio cercano del Sol son binarias o estrellas dobles -dos estrellas que orbitan una alrededor de la otra. Las estrellas dobles son importantes porque permiten a los astrónomos medir las masas de las estrellas observando el movimiento de la segunda estrella y viceversa. Sirio, Procyon, y Capella son ejemplos de estrellas dobles. También hay estrellas múltiples: tres o más estrellas en órbita una alrededor de la otra. Alpha Centauri, la estrella más cercana al Sol,

es una estrella triple. Epsilon Lyrae es una estrella cuádruple.

Como se mencionó anteriormente, existe una importante relación entre la potencia de una estrella y su masa: la potencia es proporcional, aproximadamente, al cubo de la masa. Esto se llama relación masa-luminosidad.

Las masas de las estrellas varían entre 0,1 a 100 veces la del Sol. Las potencias oscilan entre 0,0001 y 1.000.000 de veces la del Sol. Las estrellas más calientes presentan unos 50.000 K, las más frías, alrededor de 2.000 K. Cuando los astrónomos estudian las estrellas, encuentran que el Sol es más masivo y potente que el 95% de todas las estrellas en su vecindad. Las estrellas masivas y de gran potencia son extremadamente raras. El Sol no es una estrella promedio. Está por encima del promedio!

La estructura del Sol y las estrellas

La estructura del Sol y las estrellas queda determinada principalmente por la gravedad. La gravedad hace que el Sol fluido sea casi perfectamente esférico. En las profundidades del Sol, la presión aumenta, debido al peso de las capas de gas por encima. De acuerdo con la ley de los gases, que se aplica a un gas perfecto, la densidad y la temperatura también será mayor si la presión es mayor. Si las capas más profundas son más calientes, el calor fluirá hacia el exterior, ya que el calor siempre fluye de lo más caliente a lo menos caliente. Esto puede ocurrir por radiación o convección. Estos tres principios dan lugar a la ley de masa-luminosidad.

Si el calor fluye saliendo del Sol, entonces las capas más profundas se enfriarán, y la gravedad haría que el Sol se contrajera, de no existir la energía que se produce en el centro de la estrella por el proceso de la fusión termonuclear, que se describe más adelante.

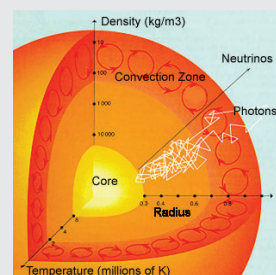


Fig. 5: Una sección del Sol, determinada a partir de modelos del Sol. En la zona exterior, la energía es transportada por convección, por debajo de esa zona, la energía es transportada por radiación. La energía se produce en el núcleo. (Fuente: Instituto de Física Teórica de la Universidad de Oslo).

Estos cuatro principios simples se aplican a todas

las estrellas. Pueden expresarse como ecuaciones y pueden ser resueltos en una computadora. Esto da un modelo de Sol o estrella: la presión, densidad y flujo de energía en cada una de las distancias desde el centro de la estrella. Este es el método básico por el cual los astrónomos conocen la estructura y evolución de las estrellas. El modelo se construye para una masa y composición específicas de la estrella, supuestas, y debe ser capaz de predecir el radio de la estrella, la potencia y otras propiedades observadas.

Los astrónomos han desarrollado recientemente un método muy eficaz para testear sus modelos de la estructura del Sol y de las estrellas -la heliosismología o, en otras estrellas, astrosismología. El Sol y las estrellas vibran suavemente en miles de diferentes patrones o modos. Esto se puede observar con instrumentos sensibles y comparar con las propiedades de las vibraciones predichas por los modelos.

La fuente de energía del Sol y de las estrellas

Los científicos se preguntaron hace muchos siglos, cuál era la fuente de energía del Sol y de las estrellas. La fuente más obvia era la combustión química de materia como el petróleo o el gas natural, pero, debido a la muy alta potencia del Sol (4×10^{26} W), esta fuente duraría sólo unos pocos miles de años. Pero hasta hace unos pocos siglos, la gente pensaba que la edad de la Tierra y el Universo era de sólo unos pocos miles de años, porque eso era lo que la Biblia parecía decir! Después de los trabajos de Isaac Newton, que desarrolló la Ley de la Gravitación Universal, los científicos se dieron cuenta de que el Sol y las estrellas podrían generar energía a partir de lentas contracciones. La energía gravitacional (potencial) de la materia se podría convertir en calor y radiación. Esta fuente de energía podría durar unas pocas decenas de millones de años. Sin embargo, la evidencia geológica sugirió que la Tierra, y por lo tanto el Sol, era mucho más vieja que eso.

A finales del siglo XIX, los científicos descubrieron la radiactividad, como un producto de la fisión nuclear. Los elementos radiactivos, sin embargo, son muy raros en el Sol y las estrellas, y no hubieran podido aportar potencia para ellos durante miles de millones de años. Finalmente, los científicos descubrieron en el siglo XX que los elementos livianos podían fundirse y transformarse en elementos más pesados, un proceso llamado fusión nuclear. Si la temperatura

y densidad eran lo suficientemente altas, estas producirían grandes cantidades de energía - más que suficiente para dar la potencia del Sol y las estrellas. El elemento con la mayor energía potencial de fusión era el hidrógeno, que es el elemento más abundante en el Sol y las estrellas.

En las estrellas de poca masa como el Sol, la fusión del hidrógeno se produce en una serie de pasos llamados cadena proton-proton o pp. Dos protones se fusionan para formar deuterio. Otro proton se une al deuterio para formar helio-3. Los núcleos de helio-3, se fusionan para producir núcleos de helio-4, el isótopo normal de helio (figura 6).

En las estrellas masivas, el hidrógeno se transforma en helio a través de una serie diferente de pasos llamados ciclo CNO, en el cual el carbono-12 se utiliza como catalizador (figura 7). El resultado neto, en cada caso, es que cuatro núcleos de hidrógeno se fusionan para formar un núcleo de helio. Una pequeña fracción de la masa de los núcleos de hidrógeno se convierte en energía. Puesto que los núcleos normalmente se repelen entre sí, debido a sus cargas positivas, la fusión se produce sólo si los núcleos chocan con gran energía (alta temperatura) y frecuentemente (alta densidad).

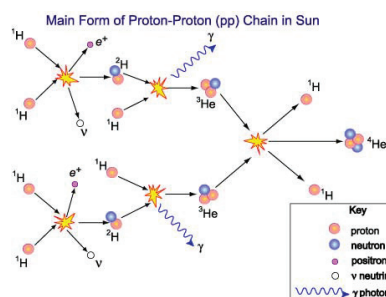


Fig. 6: La cadena de reacciones protón-protón por la cual el hidrógeno se fusiona en helio en el Sol y otras estrellas de baja masa. En ésta figura y en la siguiente, los neutrinos (ν) son emitidos en algunas de las reacciones. La energía es emitida en forma de rayos gamma (rayos γ) y energía cinética de los núcleos. (Fuente: Australia Telescope Facility Nacional).

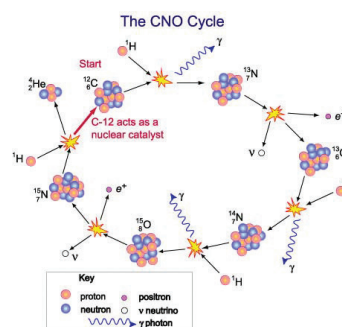


Fig. 7: El ciclo CNO mediante el cual el hidrógeno se fusiona en helio en las estrellas más masivas que el Sol. Carbono-12 (marcado como "start") actúa como un catalizador y participa en el proceso, sin ser utilizado en el mismo. (Fuente: Australia Telescope Facility Nacional).

Si la fusión nuclear es la que define la energía del Sol, entonces las reacciones de fusión deben producir un gran número de partículas subatómicas llamadas neutrinos. Normalmente, éstas pasan a través de la materia sin interactuar con ella. Hay miles de millones de neutrinos que pasan a través de nuestros cuerpos cada segundo. Con un "Observatorio de neutrinos" especial se pueden detectar algunos de estos neutrinos. El primer observatorio de neutrinos detectó sólo un tercio del número de neutrinos previsto. Este "problema de los neutrinos Solares" duró más de 20 años, pero fue eventualmente resuelto por el Observatorio de Neutrinos Sudbury (SNO) en Canadá (figura 8). El corazón del observatorio era un gran tanque de agua pesada -agua en la que algunos de los núcleos de hidrógeno son en realidad deuterio. Estos núcleos de vez en cuando absorben un neutrino y emiten un destello de luz. Hay tres tipos de neutrinos. Dos tercios de los neutrinos procedentes del Sol se transforman en otros tipos. SNO es sensible a los tres tipos de neutrinos, y detectó el número total de neutrinos predichos por la teoría.

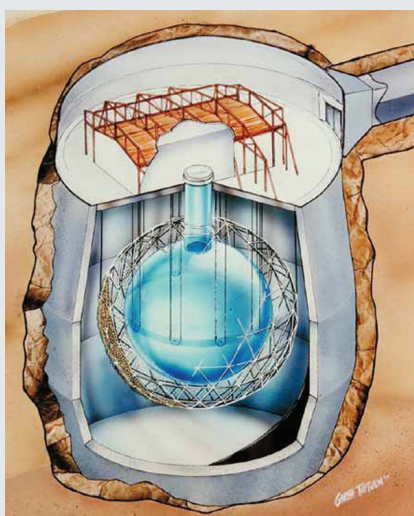


Fig. 8: El Observatorio de Neutrinos de Sudbury (Canadá), donde los científicos han confirmado los modelos de la fusión nuclear en el Sol, observando el flujo de neutrinos predicho. El corazón del observatorio es un gran tanque de agua pesada. Los núcleos de deuterio interactúan ocasionalmente con un neutrino para producir un destello de luz observable. (Fuente: Observatorio de Neutrinos de Sudbury).

Debido a que "el método científico" es un concepto tan fundamental en la enseñanza de la ciencia, debemos empezar por explicar cómo los astrónomos entienden la evolución de las estrellas:

- mediante el uso de simulaciones por ordenador, basadas en las leyes de la física, tal como se describió anteriormente;

- mediante la observación de las estrellas en el cielo, que se encuentran en distintas fases de evolución, ubicándolas en una "secuencia evolutiva" lógica;

- mediante la observación de cúmulos estelares: grupos de estrellas que se formaron al mismo tiempo de la misma nube de gas y polvo, pero con diferentes masas. Hay miles de cúmulos de estrellas en nuestra galaxia, incluyendo cerca de 150 cúmulos globulares que se encuentran entre los objetos más antiguos de nuestra galaxia. Las Híades, las Pléyades, y la mayoría de las estrellas de la Osa Mayor, son grupos que pueden verse a simple vista. Las agrupaciones son "experimentos de la naturaleza": grupos de estrellas formados del mismo material, en el mismo lugar, al mismo tiempo. Sus estrellas difieren sólo en la masa. Debido a que diferentes grupos tienen diferentes edades, podemos ver cómo una colección de estrellas de diferentes masas puede verse cuando alcance diferentes edades, tras su nacimiento.

- mediante la observación directa de las etapas rápidas de la evolución, que serán muy raras, ya que duran sólo una fracción muy pequeña de la vida de las estrellas;

- mediante el estudio de los cambios en los períodos de estrellas variables pulsantes. Estos cambios son pequeños, pero observables. Los períodos de estas estrellas dependen del radio de la estrella. Como el radio cambia debido a la evolución, el período también lo hará. El cambio en el período se puede medir a través de observaciones sistemáticas, a largo plazo, de las estrellas.

El primer método, el uso de simulaciones por ordenador, era el mismo método que se utilizó para determinar la estructura de la estrella. Una vez que la estructura de la estrella es conocida, conocemos la temperatura y la densidad en cada punto de la estrella, y calculamos cómo puede cambiar la composición química por los procesos termonucleares que se producen. Estos cambios en la composición pueden ser incorporados en el siguiente modelo en la secuencia evolutiva.

Las estrellas variables pulsantes más famosas son las llamadas Cefeidas, por la estrella Delta Cephei, que es un ejemplo brillante. Existe una relación entre el período de variación de una Cefeida y su potencia. Midiendo el período, los astrónomos pueden determinar la potencia, y por lo tanto la distancia, usando la ley del inverso del cuadrado de la distancia. Las Cefeidas son una herramienta importante para determinar el tamaño y la escala de edad del Universo.

Los alumnos pueden observar estrellas variables, a través de proyectos como Citizen Sky. Esto les permite desarrollar una variedad de habilidades en ciencia y matemáticas, mientras que hacen ciencia real y tal vez incluso contribuyan al desarrollo de conocimientos astronómicos.

Vida y muerte del Sol y las estrellas

La fusión del hidrógeno es un proceso muy eficiente. Proporciona energía a las estrellas en toda su larga vida. Las reacciones de fusión son más rápidas en el centro de la estrella, donde la temperatura y la densidad son más altas. La estrella por lo tanto desarrolla un núcleo de helio que poco a poco se expande hacia el exterior. Cuando esto ocurre, el núcleo de la estrella se reduce y se hace más caliente, por lo que el hidrógeno alrededor del núcleo de helio se calienta lo suficiente para fusionarse. Esto provoca que las capas externas de la estrella se expandan - lentamente al principio, pero luego más rápidamente. Se convierte en una estrella gigante roja, hasta cien veces más grande que el Sol. Por último, el núcleo central de helio se calienta lo suficiente como para que el helio se fusione en el carbón. Esta fusión equilibra la fuerza hacia el centro de la gravedad, pero no por mucho tiempo, porque la fusión del helio no es tan eficiente como la fusión del hidrógeno. Después de esto, el núcleo de carbón se contrae, haciéndose más caliente, y las capas externas de la estrella se expanden para convertirse en una gigante aún más grande de color rojo. Las estrellas más masivas se expanden a un tamaño aún mayor y se convierten en estrellas supergigantes rojas.

Una estrella muere cuando se le acaba el combustible. No hay otra fuente de energía para mantener el interior de la estrella caliente, y para producir una presión del gas hacia el exterior suficiente para

detener la contracción gravitatoria de la estrella. El tipo de muerte depende de la masa de la estrella.

La duración de la vida de la estrella también depende de su masa: las estrellas de baja masa tienen muy baja potencia y tiempos de vida muy largos -decenas de miles de millones de años. Las estrellas de gran masa tienen muy alta potencia y tiempos de vida muy cortos- de millones de años. La mayoría de las estrellas son de muy baja masa y su vida superará a la edad actual del Universo.

Antes de su muerte, una estrella pierde masa. Cuando ha usado el último hidrógeno, y luego lo que quedaba de helio, se expandirá transformándose en una estrella gigante roja, de más de cien veces el radio del Sol y más de mil millones de veces su volumen. Los estudiantes pueden hacer un modelo a escala, que permite visualizar los enormes cambios en el tamaño de la estrella a medida que evoluciona. La gravedad en las capas exteriores de una gigante roja es muy baja. También comienza una pulsación, una rítmica expansión y contracción. Debido al gran tamaño de una gigante roja, cada ciclo de la pulsación lleva meses o años. Esto acaba llevando a las capas exteriores de la estrella hacia el espacio, formando una hermosa nebulosa planetaria, en lenta expansión alrededor de la estrella que muere (figura 9). Los gases en la nebulosa planetaria son excitados hasta producir fluorescencia por la luz ultravioleta que proviene del núcleo caliente de la estrella. Finalmente, se aparta de la estrella, y se une con otro gas y polvo para formar nuevas nebulosas de las cuales nacerán nuevas estrellas.

La vida de las estrellas masivas es ligeramente diferente de las estrellas de baja masa. En estrellas de poca masa, la energía es transportada desde el núcleo hacia el exterior por la radiación. En el núcleo de estrellas masivas, la energía es transportada por convección, por lo que el núcleo de la estrella está completamente mezclado. Cuando el hidrógeno se agota en el núcleo, la estrella cambia muy rápidamente y se transforma en una gigante roja. En el caso de estrellas de baja masa, la transición es más gradual.

Las estrellas deben tener una masa de más de 0,08 veces la del Sol. De lo contrario, sus centros no serán lo suficientemente calientes y densos para que el hidrógeno se fusione. Las estrellas más masivas tienen masas de alrededor de un centenar de veces la del Sol y tienen tanta potencia que su propia radiación detendrá la formación y les impedirá permanecer estables.



Fig. 9: La nebulosa Helix, una nebulosa planetaria. Los gases de la nebulosa fueron expulsados de la estrella durante su fase evolutiva de gigante roja. El núcleo de la estrella es una enana blanca caliente. Se puede ver, débil, en el centro de la nebulosa. (Foto: NASA).

Estrellas comunes, de baja masa

En las estrellas con una masa inicial inferior a ocho veces la del Sol, la pérdida de masa final deja un núcleo de menos de 1,4 veces la masa del Sol. Este núcleo no tiene combustible termonuclear. La fuerza hacia el centro de la gravedad es equilibrada por la presión externa de electrones. Ellos resisten cualquier nueva contracción, debido al principio de exclusión de Pauli - una ley de la teoría cuántica que indica que hay un límite en el número de electrones que puede existir en un determinado volumen. Estos núcleos se llaman enanas blancas y tienen masas inferiores a 1,44 veces la del Sol. Esto se conoce como el límite de Chandrasekhar, porque el astrónomo indio-estadounidense y Premio Nobel Subrahmanyan Chandrasekhar demostró que una enana blanca más masiva que este límite, se derrumbaría bajo su propio peso.

Las enanas blancas son los puntos finales normales de la evolución estelar de estrellas de baja masa. Son muy comunes en nuestra galaxia, pero son difíciles de ver ya que no son más grandes que la Tierra. Aunque están calientes, tienen un área de radiación muy pequeña y son por tanto muy poco brillantes. Sus potencias son miles de veces menores que la del Sol. Las estrellas brillantes Sirio y Próxima tienen enanas blancas orbitando a su alrededor. Estas enanas blancas no tienen ninguna fuente de energía, además de su calor almacenado. Son como brasas de carbón, enfriándose en una chimenea. Después de miles de millones de años, se enfriarán por completo, y se harán frías y oscuras.



Fig. 10: La Nebulosa del Cangrejo, el remanente de una explosión de supernova que fue registrada por los astrónomos en Asia en 1054 d.C. El núcleo de la estrella que explotó es una estrella de neutrones en rápida rotación, o púlsar, dentro de la nebulosa. Una pequeña fracción de su energía de rotación se transmite a la nebulosa, haciendo que brille. (Foto: NASA).

Las estrellas raras masivas

Las estrellas masivas son calientes y de gran potencia, pero muy raras. Tienen una vida corta de unos pocos millones de años. Sus núcleos son lo suficientemente calientes y densos como para fusionar

elementos hasta el hierro. El núcleo de hierro no tiene energía disponible, ya sea por fusión o fisión. No hay una fuente de energía para mantener el núcleo caliente y para resistir la fuerza de la gravedad. La gravedad colapsa el centro de la estrella en un segundo, convirtiéndolo en una bola de neutrones (o incluso de materia extraña), liberando enormes cantidades de energía gravitacional. Esto provoca que las capas externas de la estrella estallen como una supernova (figura 10). Estas capas externas son expulsadas con velocidades de hasta 10.000 km/s y la estrella se convierte en supernova.

Una supernova, en su luminosidad máxima, puede ser tan brillante como una galaxia entera de cientos de miles de millones de estrellas. Tycho Brahe y Johannes Kepler observaron y estudiaron supernovas brillantes, en 1572 y 1604, respectivamente. Según Aristóteles, las estrellas eran perfectas y no cambiaban, pero Brahe y Kepler demostraron lo contrario. Ninguna supernova se ha observado en la Vía Láctea durante los últimos 400 años. Una supernova, visible a simple vista, se observó en 1987 en la Gran Nube de Magallanes, una pequeña galaxia satélite de la Vía Láctea.

La masa del núcleo de la supernova es mayor que el límite de Chandrasekhar. Los protones y electrones en el núcleo que se contrae, se funden para producir neutrones y neutrinos. Las explosiones de neutrinos podrían ser detectadas por un observatorio de neutrinos. Si la masa del núcleo es menor que unas tres veces la masa del Sol, la estrella será estable. La fuerza de la gravedad, hacia adentro, está equilibrada por la presión cuántica, hacia afuera, de los neutrones. El objeto se llama estrella de neutrones. Su diámetro es de unos 10 km. Su densidad es de más de 10^{14} veces la del agua. Puede ser visible con un telescopio de rayos X si todavía está muy caliente, pero las estrellas de neutrones fueron descubiertas de una manera muy inesperada - como fuentes de pulsos de ondas de radio, llamadas púlsares. Los periodos del pulso son de alrededor de un segundo, a veces mucho menos. La radiación es producida por el fuerte campo magnético de la estrella de neutrones, y que sea pulsante se debe a la rápida rotación de la estrella.

Hay un segundo tipo de supernova que se produce en sistemas estelares binarios en los que una estrella ha muerto y se ha convertido en una enana blanca. Cuando la segunda estrella comienza a expandirse, puede entregar gas a su compañera enana blanca. Si la masa de la enana blanca se hace

mayor que el límite de Chandrasekhar, el material se funde, casi al instante, transformándose en carbono, liberando suficiente energía como para destruir a la estrella.

En una explosión de supernova, todos los elementos químicos que han sido producidos por reacciones de fusión son expulsados al espacio. Los elementos más pesados que el hierro se producen sólo en este tipo de explosiones, en pequeñas cantidades.

Las estrellas muy raras y muy masivas

Las estrellas de gran masa son muy raras - una en mil millones. Tienen potencias de hasta millones de veces la del Sol, y vidas muy cortas. Son tan masivas que, cuando se acaba su energía y el núcleo se colapsa, su masa es más de tres veces la masa del Sol. La gravedad supera incluso la presión cuántica de los neutrones. El núcleo sigue hacia el colapso, hasta que es tan denso que su fuerza gravitatoria impide que algo escape de él, inclusive la luz. Se convierte en un agujero negro. Los agujeros negros no emiten radiación alguna, pero, si tienen una estrella normal como compañera, obligan a que se mueva en una órbita. El movimiento observado de la compañera permite a los astrónomos detectar el agujero negro y medir su masa. Más aún: una pequeña cantidad de gas de la estrella normal puede ser atraído hacia el agujero negro, y se calienta hasta que brilla en rayos X antes de caer en el agujero negro (figura 11). Los alrededores de los agujeros negros, son por lo tanto fuertes fuentes de rayos X y se detectan con telescopios de rayos X.

En el mismo centro de muchas galaxias, incluyendo nuestra Vía Láctea, los astrónomos han descubierto agujeros negros supermasivos, millones o miles

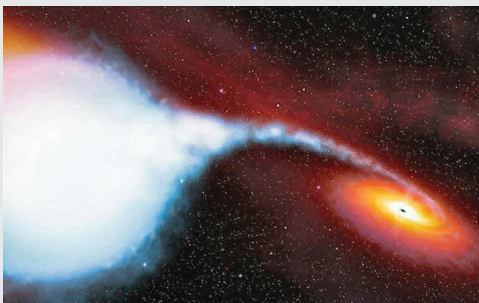


Fig. 11: Concepción artística de la estrella binaria, fuente de rayos X, Cygnus X-1. Se trata de una estrella normal masiva (izquierda) y un agujero negro (derecha), de unas 15 veces la masa del Sol, en órbita mutua. Parte de los gases de la estrella normal se ven empujados hacia un disco de acreción alrededor del agujero negro y finalmente caen en el agujero negro en sí. Los gases se calientan a temperaturas muy altas, lo que produce emisión en rayos X. (Fuente: NASA)

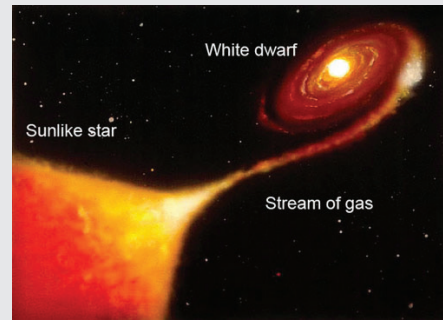


Fig.12: Una estrella variable cataclísmica. La materia es arrastrada de la estrella normal (izquierda) hacia la enana blanca (a la derecha). Esto golpea el disco de acreción alrededor de la enana blanca, lo que provoca un parpadeo en brillo. La materia eventualmente cae en la enana blanca, donde puede fulgurar o explotar. (Fuente: NASA).

de millones de veces más masivos que el Sol. Su masa se mide a partir de su efecto sobre las estrellas visibles cerca de los centros de las galaxias. Los agujeros negros supermasivos parecen haberse formado como parte del proceso del nacimiento de la galaxia, pero no está claro cómo sucedió esto. Uno de los objetivos la astronomía del siglo XXI es comprender cómo las primeras estrellas, galaxias y agujeros negros supermasivos se formaron, poco después del nacimiento del Universo.

Estrellas variables cataclísmicas

Aproximadamente la mitad de todas las estrellas son estrellas binarias, de dos o incluso más estrellas en órbita mutua. A menudo, las órbitas son muy grandes, y las dos estrellas no interfieren con la evolución de una u otra. Pero si la órbita es pequeña, las dos estrellas pueden interactuar, sobre todo cuando una se expande como gigante roja. Y si una estrella muere para convertirse en una enana blanca, una estrella de neutrones o un agujero negro, en la evolución la estrella normal puede derramar su material sobre la estrella muerta y muchas cosas interesantes pueden suceder (figura 12). El sistema de la estrella binaria varía en brillo, por diversas razones, y se llama estrella variable cataclísmica. Como se señaló anteriormente, una compañera enana blanca podría explotar como una supernova si le fuera aportada suficiente masa. Si la estrella normal derrama material rico en hidrógeno sobre la enana blanca, ese material podría explotar, a través de la fusión del hidrógeno, como una nova. El material que cae hacia la enana blanca, la estrella de neutrones o el agujero negro puede simplemente volverse muy caliente, porque su energía potencial gravitatoria se convierte en calor, y producen radiación de alta energía tales como Rayos X.

En la concepción del artista de un agujero negro

(figura 11), se puede ver el disco de acreción de gas alrededor del agujero negro, y la corriente de gas de la estrella normal que fluye hacia el mismo.

El nacimiento del Sol y las estrellas

¡Las estrellas están naciendo ahora! Debido a que las estrellas más masivas tienen una vida útil de sólo unos pocos millones de años y debido a que la edad del Universo es más de diez mil millones de años, se deduce que las estrellas masivas que vemos tienen que haber nacido hace muy poco. Su ubicación nos da una pista: se encuentran en



Fig. 13: La Nebulosa de Orión, una gran nube de gas y polvo en la cual las estrellas (y sus planetas) se están formando. El gas brilla por fluorescencia. El polvo produce manchas oscuras de absorción que se pueden ver, especialmente en la parte superior izquierda de la foto. (Foto: NASA).

y cerca de grandes nubes de gas y polvo llamadas nebulosas. El gas consiste en iones, átomos y moléculas, sobre todo de hidrógeno, algo de helio y muy pequeñas cantidades de los elementos más pesados. El polvo está formado por granos de silicato y grafito, con tamaños de menos de un micrómetro. Hay mucho menos polvo que gas, pero el polvo juega un papel importante en la nebulosa. Permite que las moléculas se formen, protegiéndolas de la intensa radiación de las estrellas cercanas. Su superficie puede servir de catalizador para la formación de moléculas. La Nebulosa más cercana, grande y brillante es la Nebulosa de Orión (figura 13). Las estrellas calientes en la nebulosa producen el resplandor de los átomos del gas por fluorescencia. El polvo se calienta y emite radiación infrarroja. También bloquea la luz de las estrellas y el gas detrás de él, causando las manchas oscuras en la nebulosa.

La gravedad es una fuerza de atracción, por lo que no es de extrañar que algunas partes de una nebulosa se contraigan lentamente. Esto ocurrirá si la fuerza gravitacional es mayor que la presión de la turbulencia en esa región de la nube. Las primeras

etapas de la contracción pueden ser ayudadas por una onda de choque de una supernova cercana o por la presión de radiación de una estrella masiva cercana. Una vez que comienza la contracción gravitatoria, continúa imparable. Alrededor de la mitad de la energía liberada a partir de la contracción gravitacional, calienta a la estrella. La otra mitad se irradia. Cuando la temperatura del centro de la estrella alcanza cerca de 1.000.000 K, la fusión termonuclear del deuterio comienza, cuando la temperatura es un poco mayor, la fusión termonuclear del hidrógeno normal comienza. Cuando la energía que se produce es igual a la energía que se irradia, la estrella "oficialmente", ha nacido.

Cuando la contracción gravitacional comienza, el material tiene una rotación muy pequeña debido a la turbulencia en la nube. A medida que la contracción continúa, "la conservación del momento angular" hace que la rotación aumente. Este efecto es comúnmente visto en el patinaje artístico, cuando el patinador quiere ir hacia un giro rápido, ubica los brazos tan cerca de su eje de rotación (su cuerpo) como sea posible, y sus giro aumenta. Como la rotación de la estrella en contracción continúa, "la fuerza centrífuga" (como es familiar pero incorrectamente llamada) hace que el material alrededor de la estrella se aplane formando un disco. La estrella se forma en el centro denso del disco. Los planetas se forman en el propio disco- los planetas rocosos cerca de la estrella y los planetas gaseosos y de hielo en el disco exterior frío.

En las nebulosas como la Nebulosa de Orión, los astrónomos han observado estrellas en todas las etapas de formación. Han observado protoplanetarios -discos proto-planetarios en los que los planetas como el nuestro se están formando. Y a partir de 1995, los astrónomos han descubierto exoplanetas o planetas extra-solares -planetas alrededor de otras estrellas como el Sol. Esta es una prueba evidente de que los planetas se forman realmente como subproducto normal de la formación estelar. ¡Puede haber muchos planetas, como la Tierra, en el Universo!

.....

Bibliografía

- Bennett, Jeffrey et al, The Essential Cosmic Perspective, Addison-Wesley; one of the best of the many available textbooks in introductory astronomy, 2005.
- Kaler, James B, The Cambridge Encyclopaedia of Stars, Cambridge Univ. Press, 2006.
- Percy, J.R, Understanding Variable Star, Cambridge University Press, 2007.

Fuentes de Internet

- American Association of Variable Star
<http://www.aavso.org/vsa>
- Página de Chandra X-Ray:
http://chandra.harvard.edu/edu/formal/stellar_ev/
- Kaler's "stellar" website:
<http://stars.astro.illinois.edu/sow/sowlist.html>
- Stellar Evolution en Wikipedia:
<http://en.wikipedia.org/wik>

Cosmología

Julieta Fierro, Beatriz García, Susana Deustua

International Astronomical Union, Universidad Nacional Autónoma de México (México DF, México), Universidad Tecnológica Nacional (Mendoza, Argentina), Space Telescope Science Institute (Baltimore, Estados Unidos)

Resumen

Aún cuando cada objeto celeste tiene encantos particulares, comprender la evolución del Universo suele ser un tema fascinante pues engloba la totalidad. Pensar que estando anclados a la vecindad terrestre podemos saber tanto - de tanto - resulta cautivador.

La astronomía en el siglo XIX se centró en la catalogación de las propiedades de los objetos celestes individuales: planetas, estrellas, nebulosas y galaxias. A finales del siglo XX en cambio, se focalizó en las propiedades de las categorías de objetos: cúmulos de estrellas, formación de galaxias y estructura del Universo. Ahora sabemos la edad y la historia del Universo y que su expansión se está acelerando, pero todavía no conocemos la naturaleza de la materia oscura. Y nuevos descubrimientos se siguen realizando.

Primero vamos a describir algunas propiedades de las galaxias que forman parte de las grandes estructuras del universo. Más adelante nos referiremos a lo que se conoce como el modelo estándar del Big Bang y la evidencia que apoya el modelo.

Objetivos

- Comprender cómo ha evolucionado el Universo desde el Big Bang a nuestros días
- Conocer cómo se organizan la materia y la energía en el Universo
- Analizar de qué manera los astrónomos pueden conocer la historia del Universo

Las Galaxias

Las galaxias están compuestas de estrellas, gas, polvo y materia oscura, y pueden ser muy grandes, de más de 300 000 años luz de diámetro. La galaxia a la que pertenece el Sol tiene cien mil millones (100 000 000 000) de estrellas. En el universo hay miles de millones de esas galaxias.

Nuestra galaxia es una gran galaxia espiral, similar a la de Andrómeda (figura 1a). El Sol tarda 200 millones años en orbitar alrededor de su centro, y viaja a 250 kilómetros por segundo. Debido a que nuestro sistema solar se encuentra inmerso en el disco de la galaxia, no podemos ver toda la galaxia, es como tratar de imaginar un bosque cuando se está en medio de él. Nuestra galaxia se llama Vía Láctea. A simple vista desde la Tierra, podemos ver muchas estrellas individuales y un ancho cinturón formado por un enorme número de estrellas y por las nubes interestelares de gas y polvo. La estructura de nuestra galaxia fue descubierta a través de observaciones con telescopios en el visible y en radio, y mediante la observación de otras galaxias (si no hubiera espejos, nos podríamos imaginar lo que nuestro propio rostro es mirando a otros rostros). Utilizamos las ondas de radio, ya que pueden pasar a través de las nubes que son opacas a la luz visible, de forma similar a la manera en que podemos recibir llamadas en el teléfono móvil dentro de un edificio.



Fig. 1a: Galaxia de Andrómeda. Galaxia espiral muy similar a la nuestra: La Vía Láctea. El Sol se encuentra en el borde exterior de uno de los brazos de nuestra galaxia. (Foto: Bill Schoening, Vanessa Harvey/REU program/NOAO/AURA/NSF) Fig. 1b: Nube Grande de Magallanes. Galaxia irregular satélite de la Vía Láctea que se puede observar a simple vista desde el hemisferio sur. (Foto: ESA y Eckhard Slawik).

Clasificamos las galaxias en tres tipos. Las galaxias irregulares son más pequeñas y abundantes y suelen ser ricas en gas, y forman nuevas estrellas. Muchas de estas galaxias son satélites de otras galaxias. La Vía Láctea tiene 30 galaxias satélite, y la

primera que fueron descubiertas son las Nubes de Magallanes, que se ven desde el hemisferio sur.

Las galaxias espirales, como la nuestra, tienen, en general, dos brazos fuertemente o débilmente retorcidos en espiral que emanan de la parte central llamada núcleo. Los núcleos de las galaxias como la nuestra tienden a tener un agujero negro de millones de veces la masa del Sol. Las nuevas estrellas nacen principalmente en los brazos, debido a la mayor densidad de la materia interestelar cuya contracción da nacimiento a las estrellas.

Cuando los agujeros negros en los núcleos de galaxias atraen nubes de gas o estrellas, la materia se calienta y antes de caer en el agujero negro, parte de ella emerge en forma de chorros de gas incandescente que se mueven a través del espacio y el medio inter-

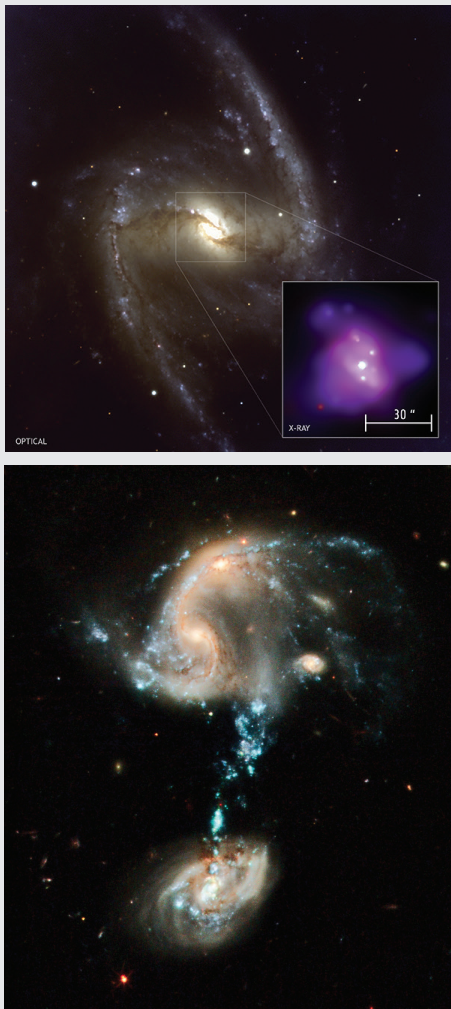


Fig. 2a: Imagen óptica de la Galaxia NGC 1365 tomada con el VLT de ESO y la imagen de Chandra de rayos X del material cercano al agujero negro central. Fig. 2b: Muestra de canibalismo galáctico donde interactúan dos galaxias fusionándose en un proceso muy espectacular. (Foto: NASA, ESA, the Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration, and A. Evans (University of Virginia, Charlottesville/NRAO/Stony Brook University)).

galáctico. Son conocidos como núcleos galácticos activos y existen en un gran número de galaxias espirales.

Las galaxias más grandes son las elípticas (aunque también hay elípticas pequeñas). Se cree que estas, así como las espirales gigantes, se forman cuando las galaxias más pequeñas se fusionan. Alguna evidencia de esto proviene de la diversidad de edades y composición química de los diversos grupos de estrellas en la galaxia fusionada.

Las galaxias forman cúmulos de galaxias, con miles de componentes. Elípticas gigantes se encuentran generalmente en los centros de los conglomerados y algunos de ellos tienen dos núcleos como resultado de una reciente fusión de dos galaxias.

Los cúmulos y supercúmulos de galaxias se distribuyen en el Universo formando estructuras filamentosas que rodean inmensos huecos desprovistos de galaxias. Es como si el Universo a gran escala fuera un baño de burbujas, donde las galaxias se encuentran en la superficie de la burbuja.

Cosmología

A continuación describiremos algunas propiedades del Universo en que vivimos. El Universo, que está formado por materia, radiación, espacio y energía, evoluciona con el tiempo. Sus dimensiones temporales y espaciales son mucho más grandes que las que empleamos en nuestra vida cotidiana.

La cosmología nos ofrece respuestas a preguntas fundamentales sobre el Universo ¿De dónde venimos? ¿Hacia dónde vamos? ¿Dónde estamos? ¿Desde cuándo?

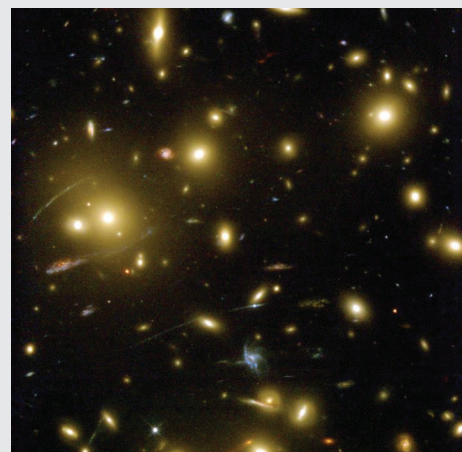


Fig. 3: Cúmulo de galaxias Abell 2218. Se pueden distinguir arcos derivados del efecto de lentes gravitacionales. (Foto: NASA, ESA, Richard Ellis (Caltech) y Jean-Paul Kneib (Observatoire Midi-Pyrénées, France)).

Vale la pena mencionar que la ciencia evoluciona. Cuanto más sabemos, más nos damos cuenta de lo mucho que no sabemos. Un mapa es útil incluso si es sólo una representación de un sitio, así es como la ciencia nos permite disponer de una representación de la naturaleza, ver algunos de sus aspectos y predecir los acontecimientos, todos ellos basados en la razón supuestos que tienen necesariamente que ser apoyados con mediciones y datos.

Las dimensiones del Universo

Las distancias entre las estrellas son enormes. La Tierra está a 150.000.000 de kilómetros del Sol, Plutón está 40 veces más lejos. La estrella más cercana está 280.000 veces más distante, y la galaxia más cercana está diez mil millones (10.000.000.000) veces más lejos. La estructura de filamentos de galaxias es diez billones (un uno seguido de 12 ceros) de veces mayor que la distancia de la Tierra al Sol.

La edad del Universo

Nuestro Universo comenzó hace 13,7 mil millones (13.700.000.000) de años. El sistema solar se formó mucho más tarde, hace 4,6 millones de (4.600.000.000) de años. La vida en la Tierra surgió hace 3,8 mil millones (3.800.000.000) de años y los dinosaurios se extinguieron hace 6,5 millones (6.500.000) de años. Los seres humanos modernos sólo han aparecido hace unos 150.000 años.

Razonamos que nuestro universo tuvo un origen en el tiempo porque se observa que se está expandiendo rápidamente. Esto significa que todos los grupos de galaxias se están alejando unos de otros y las galaxias más distantes se están alejando más rápido. Si medimos la tasa de expansión se puede estimar cuándo todo el espacio estaba junto. Este cálculo da una edad de 13,7 millones de años. Esta edad no contradice la evolución estelar, ya que no observamos estrellas ni las galaxias mayores de 13,5 millones de años. El evento que inició la expansión del Universo se conoce como Big Bang.

Medición de velocidad

Se puede medir la velocidad de una estrella o galaxia utilizando el efecto Doppler. En la vida diaria experimentamos el efecto Doppler cuando escuchamos el cambio de tono de una ambulancia o sirena de la policía, que se acerca y luego se aleja. Un experimento simple es colocar un reloj de alarma en una bolsa con un mango largo. Si otra persona hace girar la bolsa por el asa con su brazo extendido por encima de su cabeza, podemos detectar

que el tono cambia cuando se mueve del reloj hacia o alejándose de nosotros. Podríamos calcular la velocidad del reloj al escuchar el cambio del tono, que es más alto si la velocidad es mayor.

La luz emitida por los objetos celestes también pasa por un cambio de frecuencia o cambio de color que se puede medir en función de la velocidad con que éstos se aproximan o salen. La longitud de onda es más larga (más rojo) cuando se alejan de nosotros y más corta (azul) cuando se mueven hacia nosotros.

Cuando el Universo era más compacto, las ondas sonoras pasando a través de él produjeron regiones de mayor y menor densidad. Los supercúmulos de galaxias se formaron cuando la densidad de la materia era más alta. A medida que el Universo se expandió, el espacio entre las regiones de alta densidad aumentó en tamaño y volumen. La estructura filamentar del Universo es el resultado de su expansión.

Ondas sonoras

El sonido viaja a través de un medio, como el aire, el agua o la madera. Cuando producimos un sonido, generamos una onda que comprime el material de su entorno. Esta onda de compresión se desplaza a través del material hasta nuestro oído y comprime el tímpano, que envía el sonido a nuestras células nerviosas sensibles. No oímos las explosiones del Sol o de las tormentas de Júpiter debido a que el espacio entre los objetos celestes está casi vacío y por lo tanto la compresión de sonido no puede propagarse.

Es de destacar que no existe un centro de expansión del Universo. Usando una analogía bidimensional, imaginemos que estábamos en París, en la sede de la UNESCO y la Tierra se está expandiendo. Observaríamos que todas las ciudades se alejarían las unas de las otras, y de nosotros, pero no tendríamos razón para decir que estamos en el centro de la expansión, porque todos los habitantes de otras ciudades observarían la expansión de la misma manera.

Aunque desde nuestro punto de vista la velocidad de la luz de 300.000 kilómetros por segundo es muy rápida, no es infinitamente rápida. La luz de las estrellas tarda cientos de años en llegar a la Tierra y la luz de las galaxias lleva viajando millones de años. Toda la información del cosmos tarda mucho tiempo en llegar por lo que siempre vemos las

estrellas como fueron en el pasado, no como son ahora.

Hay objetos tan distantes que su luz no ha tenido tiempo de llegar hasta nosotros, sin embargo aunque no podemos verlos, no es que no estén allí, simplemente que se formaron después que la radiación procedente de esa región del cielo nos ha alcanzado.

La velocidad finita de la luz tiene varias implicaciones para la astronomía. Las distorsiones en el espacio afectan a la trayectoria de la luz, por lo que vemos una galaxia en un lugar dado donde en realidad no puede estar allí ahora, porque la curvatura del espacio cambia su posición. Además, una estrella ya no está en el lugar donde se observa debido a que las estrellas se mueven. Tampoco son como las vemos ahora. Siempre vemos los objetos celestes como eran, y cuanto más distantes estén, los vemos más atrás en su pasado. El análisis de objetos similares a diferentes distancias es equivalente a ver el mismo objeto en diferentes momentos de su evolución. En otras palabras, podemos ver la historia de las estrellas, si nos fijamos en aquellos que asumimos son tipos similares, pero a diferentes distancias.

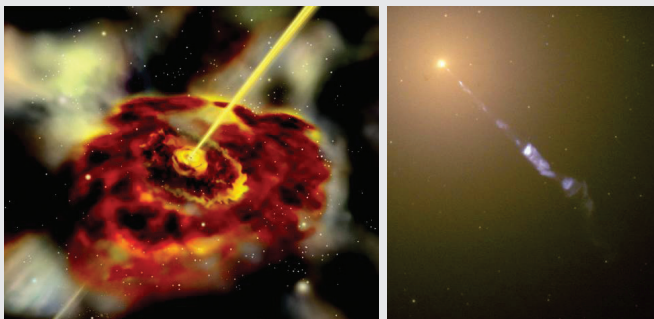


Fig. 4a: Ilustración de artista de un agujero negro en el centro de una galaxia. (Foto: NASA E/PO - Sonoma State University, Aureore Simonnet) Fig. 4b: Galaxia M87, ejemplo de galaxia real con un chorro que la acompaña. (Foto: NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)).

No podemos ver el borde del Universo, porque su luz no ha tenido tiempo de llegar a la Tierra. Nuestro Universo es infinito en tamaño, por lo que sólo se ve una sección de 13,7 mil millones de años luz de radio, es decir, donde la luz ha tenido tiempo de llegar hasta nosotros desde el Big Bang. Una fuente emite luz en todas las direcciones, por lo que las diferentes partes del Universo son coincidentes de su existencia en tiempos diferentes. Vemos todos los objetos celestes como lo eran en el momento de emitirse la luz que ahora observamos, porque

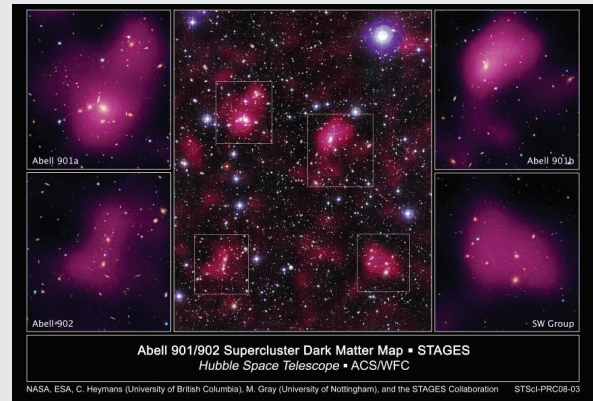


Fig. 5: Hasta la fecha se han localizado más de 300 nubes oscuras y densas de polvo y gas donde están ocurriendo procesos de formación estelar. SuperCúmulo Abell 901/902. (Foto: Hubble Space Telescope, NASA, ESA, C. Heymans (University of British Columbia) y M. Gray (University of Nottingham)).

toma un tiempo finito para la luz llegar hasta nosotros. Esto no significa que tenemos una posición privilegiada en el universo, cualquier observador de otra galaxia observaría algo equivalente a lo que detectamos nosotros.

Al igual que todas las ciencias, en astronomía y astrofísica cuanto más aprendemos acerca de nuestro Universo, más preguntas descubrimos. Ahora hablemos de la materia oscura y la energía oscura, para dar una idea de lo mucho que aún no sabemos sobre el Universo.

La materia oscura no interactúa con la radiación electromagnética, por lo que no absorbe ni emite luz. La materia ordinaria, como la de una estrella, puede producir luz, o absorberla, al igual que una nube de polvo interestelar. La materia oscura es insensible a cualquier radiación pero tiene masa y por lo tanto tiene atracción gravitatoria. Fue descubierta a través de sus efectos sobre el movimiento de la materia visible. Por ejemplo, si una galaxia se mueve en una órbita alrededor de un espacio vacío, aparentemente, estamos seguros de que algo la está atrayendo. Al igual que el sistema solar se mantiene unido por la fuerza gravitacional del Sol, que mantiene a los planetas en sus órbitas, la galaxia en cuestión tiene una órbita a causa de algo que la atrae. Ahora sabemos que la materia oscura está presente en las galaxias individuales, en los cúmulos de galaxias y parece ser el fundamento de la estructura filamentosa del Universo. La materia oscura es el tipo más común de materia en el cosmos.

También sabemos ahora que la expansión del Universo se está acelerando. Esto significa que hay una

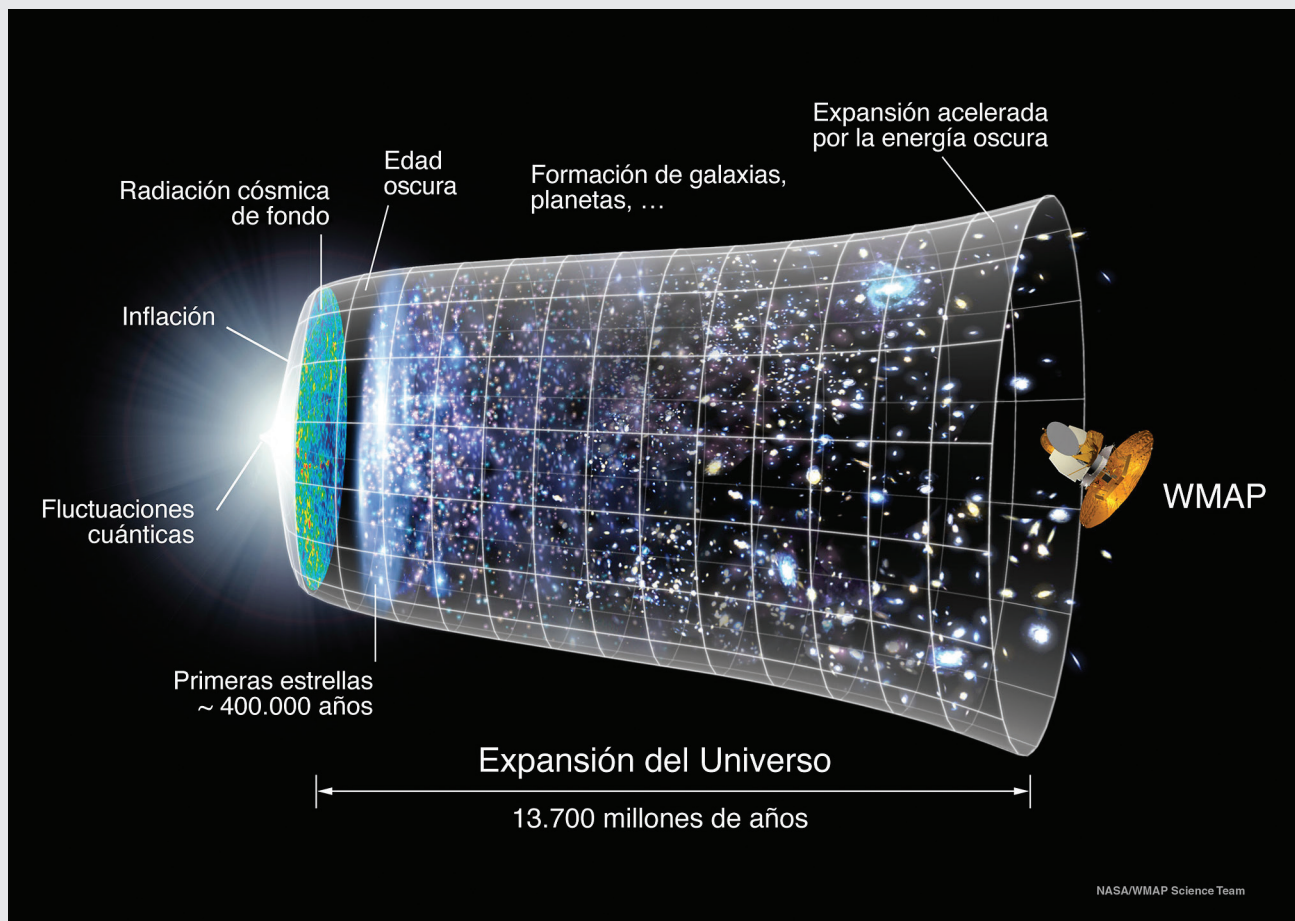


Fig. 6: Expansión del Universo. (Foto: NASA).

fuerza que contrarresta el efecto de la gravedad. Energía oscura es el nombre dado por los astrónomos para este fenómeno recientemente descubierto. En ausencia de la energía oscura, la expansión del universo se ralentiza.

Nuestro conocimiento actual del contenido de la materia-energía del universo indica que el 74 por ciento es energía oscura, el 22 por ciento es materia oscura y sólo el 4 por ciento es normal, la materia luminosa (todas las galaxias, estrellas, planetas, gas, polvo). Básicamente, la naturaleza y las propiedades de un 96 por ciento del universo aún no se han descubierto.

El futuro de nuestro Universo depende de las cantidades de materia visible, la materia oscura y la energía oscura. Antes del descubrimiento de la materia oscura y la energía oscura, se pensaba que la expansión cesaría, y la gravedad podría revertir la expansión resultante en el Big Crunch, en el que todo volvería a un solo punto. Pero una vez que se estableció la existencia de la materia oscura, se modificó la teoría. Ahora, la expansión podría alcanzar un valor constante en un tiempo infinito en el futuro. Pero, ahora que sabemos de la energía

oscura, el futuro esperado es que la expansión se acelerará, al igual que el incremento de volumen del universo. En ese escenario, el universo será muy frío y muy oscuro por un tiempo infinito.

.....

Bibliografía

- Greene, B., The Fabric of the Cosmos: Space, Time and the Texture of Reality (2006) / El tejido del cosmos (2010)
- Fierro, J., La Astronomía de México, Lectorum, México, 2001.
- Fierro, J, Montoya, L., La esfera celeste en una peca, El Correo del Maestro, México, 2000.
- Fierro J, Domínguez, H, Albert Einstein: un científico de nuestro tiempo, Lectorum, México, 2005.
- Fierro J, Domínguez, H, La luz de las estrellas, Lectorum, El Correo del Maestro, México, 2006.
- Fierro J, Sánchez Valenzuela, A, Cartas Astrales, Un romance científico del tercer tipo, Alfaguara, 2006.

Fuentes de Internet

- The Universe Adventure

<http://www.universeadventure.org/> or

<http://www.cpepweb.org>

- Ned Wright's Cosmology Tutorial (in English,
French and Italian)

<http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>

Historia de la astronomía

Jay Pasachoff, Magda Stavinschi,

Mary Kay Hemenway

International Astronomical Union, Williams College (Massachusetts, USA), Instituto Astronómico de la Academia Rumana (Bucarest, Rumania), Universidad de Texas (Austin, USA).

Resumen

Esta breve reseña de la Historia de la Astronomía ofrece una descripción de la presencia en todos los pueblos de la astronomía desde sus orígenes, seguido de un resumen de los acontecimientos clave en el desarrollo de la astronomía en Europa occidental hasta la época de Isaac Newton.

Objetivos

- Dar una visión general de la historia de la astronomía en diferentes áreas del globo de una manera superficial, pero con el objetivo de mostrar que la astronomía ha sido y es de interés para todos los pueblos.
- Mencionar las grandes figuras de la historia de la astronomía que dieron un vuelco a la forma de enfocar dicha materia hasta llegar a Newton: Tycho-Brahe, Copérnico, Kepler y Galileo.
- La brevedad necesaria en una conferencia no permite desarrollar la historia de la astronomía en nuestros días, pero estos contenidos están presentes en otros capítulos de este libro.

Prehistoria

Con el cielo oscuro, los pueblos antiguos podían ver las estrellas: se levantaban en la parte oriental del cielo, se movían hacia arriba, y se ponían en el oeste. En una dirección, las estrellas se movían en círculos diminutos. Hoy en día, cuando miramos hacia el norte, vemos una estrella en esa posición - la Estrella del Norte, o Polar. No es una estrella muy brillante: 48 estrellas en el cielo son más brillantes que ella, pero está en un lugar interesante. En tiempos antiguos, otras estrellas se alinearon con el Polo Norte de la Tierra, o, a veces, no había estrellas en la vecindad del polo.

Desde que la gente comenzó a mirar el cielo, se dio cuenta de que algunos de los objetos más brillantes no salen y se ponen exactamente con las estrellas. Por supuesto, la Luna es, de lejos, el objeto más

brillante del cielo nocturno. Se eleva casi una hora más tarde cada noche, y aparece en un contexto diferente de las estrellas. Su forma también cambia, lo que ahora llamamos fases.

Pero algunas de estas luces en el cielo se mueven de forma diferente de las otras. Estas fueron llamadas errantes o planetas por los griegos. Prácticamente todas las civilizaciones de la Tierra se dieron cuenta, y nombraron, estos objetos.

Algunos pueblos antiguos construyeron monumentos como círculos, como Stonehenge en Inglaterra, o tumbas como las de Menorca, en España, que estaban alineadas con la Cruz del Sur en 1000 a.C. Los babilonios fueron grandes estudiosos de los fenómenos astronómicos, pero fueron los griegos los que construyeron la disciplina que trata de explicar el firmamento.

Los griegos

La mayoría de los griegos antiguos, como Aristóteles (384 a.C - 322 a.C), pensaban que la Tierra estaba en el centro del Universo, y estaba hecha de cuatro elementos: Tierra, Aire, Fuego y Agua. Más allá de la Tierra estaba un quinto elemento, el éter (o quinta esencia), que constituía los puntos de la luz en el cielo.

Se dieron cuenta de que algunos de los objetos se movían de forma diferente al resto de las estrellas. Estos se bautizaron como "errantes", o planetas. En su mayoría, se mueven en la misma dirección que las estrellas: salen por el este y se dirigen hacia el oeste. Pero a veces, parece que hagan una pausa y vayan hacia atrás con respecto a las estrellas. Este movimiento hacia atrás se llama movimiento "retrógrado", para diferenciarlo del movimiento hacia adelante, llamado "directo".

El astrónomo griego Claudio Ptolomeo (90-168) trabajó en Alejandría en el norte de África en el siglo II d.C. Ptolomeo quería ser capaz de predecir las posiciones de los planetas y llegó a una solu-

ción matemática. Siguiendo a Aristóteles, puso a la Tierra en el centro del Universo. La Luna y los planetas estaban a su alrededor en círculos anidados que se hacían grandes con la distancia a la Tierra. ¿Qué pasaría si los planetas se movieran realmente en pequeños círculos cuyos centros estuvieran en los círculos grandes? Entonces, en algunos de los movimientos de los pequeños círculos, estarían moviendo más rápidamente hacia atrás que los centros de estos círculos se mueven hacia adelante. Para nosotros, desde la Tierra, veríamos que los planetas se mueven hacia atrás. Esos pequeños círculos se llaman "epiciclos", y los grandes círculos se llaman "deferentes". La idea de Ptolomeo de que los círculos se mueven en círculos tuvo influencia en la ciencia occidental por más de un millar de años. Yendo desde la observación a la teoría del uso de las matemáticas fue un paso único e importante en el desarrollo de la ciencia occidental.

A pesar de que no tenían los mismos nombres para los objetos que observaron, prácticamente todas las culturas en la Tierra miraban el cielo. Ellos usaron la información para establecer calendarios y predecir los ciclos de las estaciones para la siembra, la cosecha, o la caza, así como las ceremonias religiosas. Como los griegos, algunos de ellos desarrollaron las matemáticas muy sofisticadas para predecir los movimientos de los planetas o eclipses, pero esto no quiere decir que se trató, de lo que podríamos llamar, una teoría científica. He aquí algunos ejemplos:

África

Se situaron piedras de pie en Nabta, en el Desierto de Nubia, unos 1000 años antes de Stonehenge. Los egipcios utilizaron la astronomía para alinear sus pirámides, así como ampliar sus creencias religiosas al incluir la ciencia de las estrellas. Petroglifos en Namoratunga (Kenia) comparten aspectos de marcas de ganado. La tradición de las estrellas viene de todas las áreas de África, de la región de Dogon de Malí, de África occidental, de Etiopía y de Sudáfrica.

Astronomía islámica

Muchos adelantos astronómicos se hicieron en el mundo islámico, especialmente durante la Edad de Oro Islámica (de los siglos VIII al XV), y en su mayoría escritos en su lengua árabe. Gran parte se desarrolló en el Oriente Medio, Asia Central, Al-Andalus, el norte de África, y más tarde en el Lejano Oriente y la India. Un número significativo de estrellas en el cielo, como Aldebarán y Altair, y términos astro-

nómicos, tales como alidada, azimut, almucantar, todavía se mencionan por sus nombres árabes. Los árabes inventaron los números arábigos, incluyendo el uso del cero. Ellos estaban interesados en determinar la posición del Sol y la hora del día (ya que era útil para sus servicios religiosos). También hicieron muchos descubrimientos en óptica. Gran número de obras en griego se han conservado para la posteridad a través de sus traducciones al árabe. Las primeras observaciones sistemáticas en el Islam se llevaron a cabo bajo el patrocinio de Al-Maamun (786-833). Aquí, y en muchos otros observatorios privados de Damasco a Bagdad, se midieron los grados del meridiano, se establecieron los parámetros solares y se emprendieron observaciones detalladas del Sol, la Luna y los planetas. Algunos instrumentos usados por la Astronomía Islámica fueron: globos celestes y esferas armilares, astrolabios, relojes de sol y cuadrantes.



Fig. 1: Astrolabio Árabe.

Las Américas:

Norte América

Los pueblos nativos de América del Norte también dieron nombre a sus constelaciones del cielo y contaban historias que se transmitían a través de la tradición oral. Algunos artefactos, tales como ruedas de piedra o los alineamientos en la construcción, permanecen como evidencia de su uso de la astronomía en la vida cotidiana.

Astronomía maya

Los mayas fueron una civilización mesoamericana, que destaca por ser la única, que tuvo lengua escrita, totalmente desarrollada de la América precolombina, arte, arquitectura, matemáticas y sistemas astronómicos. Desde los primeros tiempos, durante el período Preclásico (c. 2000 a.C. a 250 d.C.), las ciudades mayas alcanzaron su más alto grado de desarrollo durante el período Clásico (c. 250 d.C. a 900 d.C.), y continuó durante todo el pe-

riodo post-clásico hasta la llegada de los españoles. Los pueblos mayas no desaparecieron, ni en el momento de la disminución del período Clásico, ni con la llegada de los conquistadores españoles y la posterior colonización española de las Américas.

La astronomía maya es una de las astronomías conocidas más antiguas en el mundo, sobre todo debido a su famoso calendario, mal interpretado ahora como la predicción del fin del mundo. La maya parece ser la única pre-telescópica civilización que demuestra el conocimiento de la Nebulosa de Orión como difusa, es decir, no un puntito estelar.



Fig. 2: Chichén Itzá (México) son unos importantes restos arqueológicos de la astronomía maya.

Los mayas estaban muy interesados en los pasajes cenitales, el momento en que el Sol pasa directamente sobre la cabeza del observador. Las latitudes de la mayoría de sus ciudades se encuentran por debajo del Trópico de Cáncer, estos pasajes cenitales tendrían lugar dos veces al año a igual distancia del solsticio. Para representar esta posición del Sol sobre sus cabezas, los mayas tenían un dios llamado Dios Descendente.

Venus era el objeto astronómico más importante para los mayas, incluso más que el Sol. El calendario maya era un sistema de calendarios y almanaques utilizados en la civilización maya de la Mesoamérica precolombina, y en algunas comunidades mayas modernas en el altiplano de Guatemala y Oaxaca, México. Aunque el calendario mesoamericano no se originó con los mayas, sus posteriores ampliaciones y mejoras fueron las más sofisticadas. Junto con los de los aztecas, los calendarios mayas son los mejor documentados y más entendidos.

Astronomía azteca

Los aztecas eran grupos étnicos del centro de México, en particular los grupos que hablaban la lengua náhuatl y que dominaron gran parte de Mesoamérica en los siglos XIV, XV y XVI, en un período

conocido como el post-clásico tardío en la cronología mesoamericana.

La cultura y la historia azteca son conocidas, principalmente, a través de las pruebas arqueológicas encontradas en excavaciones como la del famoso Templo Mayor en Ciudad de México y en muchas otras, también es conocida por los códices indígenas de corteza de papel, desde relatos de testigos por los conquistadores españoles o por descripciones de los siglos XVI y XVII de la cultura azteca y la historia escrita por clérigos españoles y letrados aztecas que sabían el idioma español o náhuatl.

El Calendario Azteca o Piedra del Sol, es el primer monolito de lo que queda de la cultura pre-hispánica en Centroamérica y Sudamérica. Se cree que fue tallado entorno al año 1479. Este es un monolito circular con cuatro círculos concéntricos. En el centro aparece el rostro de Tonatiuh (Dios Sol), adornado con Jade y sosteniendo un cuchillo en la boca. Los cuatro soles o "mundos" anteriores están representados por fi uras de forma cuadrada que flanquean el Quinto Sol, en el centro. El círculo exterior consta de 20 áreas que representan los días de cada uno de los 18 meses que conformaron el calendario azteca. Para completar el año solar de 365 días, los aztecas incorporaron 5 días de sacrificio, o Nemontemi.

Al igual que casi todos los pueblos antiguos, los aztecas agruparon en asociaciones las estrellas aparentemente brillantes (las constelaciones): Mammahuaztli (Cinturón de Orión), Tianquiztli (las Pléyades), Citlaltlactli (Géminis), Citlalcolotl (Escorpio) y Xonecuilli (La Osa Menor, o Cruz del Sur para otros, etc). Los cometas fueron llamados "las estrellas que fuman."

Los grandes períodos de tiempo en la cosmología azteca están definidos por las eras de soles diferentes, cada uno de los finales fue determinado por desastres cada vez más importantes, como la destrucción de los jaguares, huracanes, incendios, inundaciones o terremotos.

Astronomía Inca

La civilización Inca es una civilización pre-colombina del Grupo Andino. Empieza a principios del siglo XIII en la cuenca del Cuzco, en el actual Perú, y luego creció a lo largo del Océano Pacífico y los Andes, cubriendo la parte occidental de América del Sur. En su apogeo, se extendió desde Colombia hasta Argentina y Chile, a través del Ecuador, Perú y Bolivia.

Los incas consideraban que su Rey, Sapa Inca, el “hijo del Sol”. Sus miembros identificaban varias áreas oscuras o nebulosas oscuras en la Vía Láctea como animales, y se asociaba su aparición con las lluvias estacionales.

Los incas usaron un calendario solar para la agricultura y un calendario lunar para las fiestas religiosas. Según las crónicas de los conquistadores españoles, en las afueras de Cuzco, en el actual Perú había un gran calendario, que consistía en 12 columnas de 5 metros de altura cada una que se podían ver desde lejos. Con eso, la gente podía saber la fecha. Celebraban dos grandes fiestas, el *Inti Raymi* y *Capac Raymi*, el solsticio de invierno y verano, respectivamente.

Los incas tenían sus propias constelaciones: el Yutu (perdiz) era la zona oscura de la Vía Láctea que llamamos el Saco de Carbón. Llamaron a las Pléyades cúmulo Qollqa. Con las estrellas de la constelación de Lyra, hicieron un dibujo de uno de los animales más conocidos por ellos, y lo llamaron Pequeña Llama de Plata o Llama de color, cuya estrella más brillante (Vega) fue *Urkuchillay*, aunque según otros, ese era el nombre de toda la constelación. Por otra parte estaban los *Machacuay* (serpiente), la *Hamp'atu* (sapo), la *Atoq* (zorro), el *Kuntur*, etc.

Las grandes ciudades se construyeron siguiendo las alineaciones celestes y el uso de los puntos cardinales.

En las afueras de Cuzco, había un importante templo dedicado al Sol (*Inti*), del que salían algunas líneas de forma radial que dividían el valle en 328 templos. Ese número es todavía un misterio, pero una posible explicación lo relaciona con la astronomía: coincide con los días que contienen doce meses lunares. Y los 37 días que faltan hasta los 365 días del año solar coincide con los días en que el cúmulo de las Pléyades no es observable desde el Cuzco.

India

La primera mención textual que se da en la literatura religiosa de la India (segundo milenio a.C) se convirtió en una tradición establecida por el primer milenio a.C, cuando las distintas ramas auxiliares de la educación comenzaron a tomar forma.

Durante los siguientes siglos, una serie de astrónomos indios estudiaron varios aspectos de las ciencias astronómicas, y siguieron un discurso global con otras culturas. Gnómones y esferas armilares

eran instrumentos comunes.

El calendario hindú utilizado en la antigüedad ha sufrido muchos cambios en el proceso de regionalización, y hoy en día existen varios calendarios regionales de la India, así como un calendario nacional. En el calendario hindú, el día comienza con la salida del Sol local. Se le adjudicarán cinco “propiedades”, llamada *angas*.

La eclíptica se divide en 27 *nakshatras*, que se llaman indistintamente casas lunares o asterismos. Estas reflejan el ciclo de la luna contra las estrellas fijas, de 27 días y 72 horas, siendo la parte fraccionaria compensada intercalando un *nakshatra* 28. Los cálculos de los *nakshatra* parecen haber sido bien conocidos en época del *Rig Veda* (segundo y primer milenio a.C).

China

Los chinos podrían ser considerados como los observadores más persistentes y precisos de los fenómenos celestes en cualquier parte del mundo antes de los árabes. Hicieron registros detallados de las observaciones astronómicas que se iniciaron durante el período de los Reinos Combatientes (siglo IV a.C) y prosperaron a partir del período Han.

Algunos elementos de la astronomía india llegaron a China con la expansión del budismo después de la Dinastía Han (25-220), pero la incorporación más detallada de la Astronomía India ocurrió durante la dinastía Tang (618-907).

La astronomía se revitalizó bajo el estímulo de la cosmología y la tecnología occidental después de que los jesuitas establecieron sus misiones. El telescopio se introdujo en el siglo XVII. El equipo y la innovación utilizada por la astronomía China: esfera armilar, globo celeste, la esfera armilar de accionamiento hidráulico y la torre del globo celeste.

La astronomía china se centró más en las observaciones que en la teoría. Según los escritos de los jesuitas, que visitaron Pekín en el siglo XVII, los chinos tenían datos desde el año 4000 a.C, entre ellos la explosión de las supernovas, los eclipses y la aparición de cometas.

En el año 2300 a.C, desarrollaron el primer calendario solar conocido, y en el año 2100 a.C registraron un eclipse solar. En el año 1200 a.C describieron manchas solares, que llamaron “puntos oscuros” en el Sol. En el año 532 a.C, dejaron evidencia de la aparición de una estrella supernova en la constela-

ción del Águila, y en los 240 y 164 a.C dejaron evidencia del paso del cometa Halley. En el 100 a.C los chinos inventaron la brújula con la que marcaron la dirección norte.

Y en tiempos más recientes, determinaron que la precesión de los equinoccios era de 1 grado cada 50 años, registraron más supernovas y encontraron que la cola de los cometas siempre apunta en la dirección opuesta a la posición del Sol.

En el año 1006 se observó la aparición de una supernova tan brillante que podía verse durante el día. Se trata de la supernova más brillante que ha sido reportada. Y en 1054, se observó una supernova, los restos de lo que más tarde se llamaría la Nebulosa del Cangrejo.

Su esfera celeste difiere de la occidental. El ecuador celeste se dividió en 28 partes, llamadas "casas", y hubo un total de 284 constelaciones con nombres como Osa, Tres Pasos, Palacio Supremo, trípode, lanza o arpón. El Año Nuevo Chino comienza el día de la primera luna nueva después de que el Sol entre en la constelación de Acuario.

El erudito científico chino Shen Kuo (1031-1095) no sólo fue la primera persona en la historia que describió la brújula de aguja, sino que también hizo una medición más precisa de la distancia entre la Estrella Polar y el Norte verdadero que se podría utilizar para la navegación. Shen Kuo y Pu Wei también establecieron un proyecto de observación astronómica nocturna en un período de cinco años consecutivos, un intenso trabajo que incluso puede competir con el trabajo posterior de Tycho Brahe en Europa. Para este proyecto, también trazaron las coordenadas exactas de los planetas en un mapa de estrellas y crearon las teorías del movimiento planetario, incluyendo el movimiento retrógrado.

Europa Occidental

Después de la caída de Roma, el conocimiento recogido por los griegos fue apenas transmitido a través del trabajo de los monjes que con frecuencia copiaban manuscritos que no tenía ningún sentido para ellos. Con el tiempo, con el surgimiento de las escuelas de la catedral y las primeras universidades, los académicos comenzaron a hacer frente a los enigmas que la ciencia ofrecía. A través del comercio (y saqueo), manuscritos nuevos vinieron del oriente a través de las Cruzadas, y el contacto con los eruditos Islámicos (sobretudo en España) permitieron realizar las traducciones al latín. Algunos eruditos intentaron extraer la información en un

orden que se ajustara a un punto de vista cristiano.

Genio matemático: Nicolás Copérnico de Polonia
En el 1500, Nicolás Copérnico (1473-1543) llegó a la conclusión que el Universo sería más sencillo si el Sol, en lugar de la Tierra, fuese su centro. Entonces, el movimiento retrógrado de los planetas podría ocurrir incluso si todos los planetas simplemente orbitaran alrededor del Sol en círculos. El movimiento hacia atrás sería una ilusión óptica que se produciría cuando adelantamos a otro planeta. Del mismo modo, si nos fijamos en el coche que está a la derecha, mientras que ambos estamos detenidos en un semáforo, cuando usted comienza a moverse en primer lugar, podría pensar que el otro coche se está moviendo hacia atrás.

Copérnico compartió sus ideas con los matemáticos, pero no las publicó hasta que un joven científico, Georg Rheticus, lo convenció y lo arregló para hacer la publicación en otra ciudad. Una copia impresa de *De revolutionibus orbium Coelestium* llegó justo cuando Copérnico estaba muriendo en 1543. Él podría no haber visto nunca el prefacio sin firmar escrito por el editor que sugería que el libro era una manera matemática para calcular la posición, no la verdad real. Siguiendo a Aristóteles, Copérnico usó círculos y añadió algunos epiciclos. Su libro siguió la estructura del libro de Ptolomeo, pero su devoción a la simplicidad matemática fue influenciada por Pitágoras.

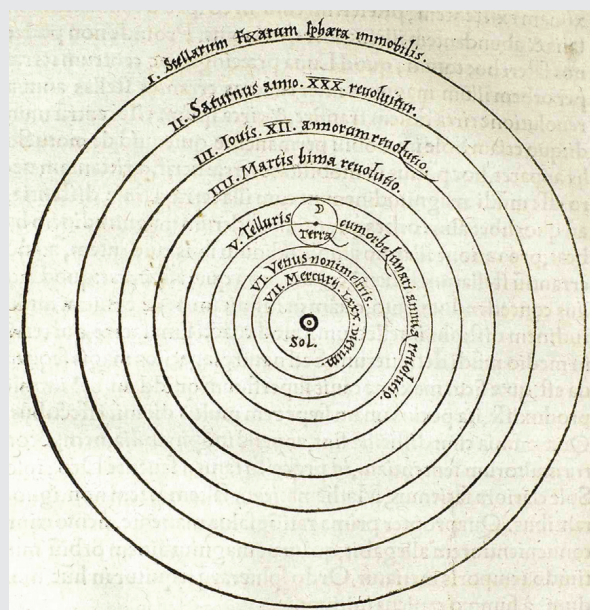


Fig. 3. El diagrama de Copérnico que muestra por primera vez el Sol en el centro de lo que ahora llamamos el Sistema Solar. Este diagrama está en la primera edición de *De revolutionibus orbium Coelestium* (Sobre las revoluciones de los orbes celestes), publicado en 1543.

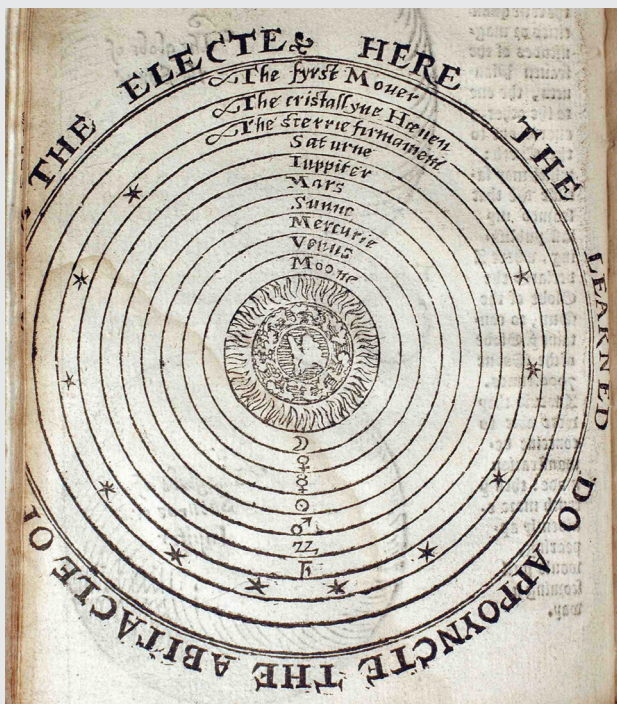


Fig. 4. El primer diagrama de Copérnico en inglés del Apéndice de Thomas Digges A un pronóstico eterno, un libro escrito por su padre, publicado por primera vez en 1556. Contenía sólo un diagrama de Ptolomeo. El Apéndice de Thomas Digges apareció por primera vez en 1576; este diagrama es del 1596, fecha de la impresión.

El libro de Copérnico contiene (figura 3) tal vez el diagrama más famoso de la historia de la ciencia. Se muestra el Sol en el centro de una serie de círculos. Copérnico calculó las velocidades a las que los planetas giraban alrededor del Sol, ya que sabía cuales iban más rápido en el cielo. De este modo obtuvo los planetas en el orden correcto: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, y consiguió las distancias relativas de los planetas también correctas. Sin embargo, sus cálculos realmente no predecían las posiciones de los planetas mucho mejor que el método de Ptolomeo.

En Inglaterra, Leonard Digges escribió un libro, en inglés, sobre la Tierra y el Universo. En 1576, su hijo Thomas escribió un apéndice en el que se describían las nuevas ideas de Copérnico. En el apéndice, una versión en inglés del diagrama de Copérnico apareció por primera vez (figura 4). Digges también mostró las estrellas a diferentes distancias del Sistema Solar, no sólo en una esfera celeste.

Genio observacional: Tycho Brahe de Dinamarca. El aristócrata danés Tycho Brahe (1546-1601) se hizo cargo de una isla frente a la costa de Copenhague, y recibió el alquiler de los residentes. En esta isla, Hven, utilizó su riqueza para construir un gran observatorio con los instrumentos más gran-

des y mejores. Aunque éstos fueron instrumentos pre-telescópicos, eran notables porque permitían mediciones más precisas de las posiciones de las estrellas y los planetas.

Tycho fue precursor de la universidad de hoy, con los científicos visitantes que iban a trabajar con él. Él hizo cada vez mejores dispositivos de observación para medir las posiciones de las estrellas y los planetas, y mantenía registros precisos.

Pero en su celo científico, se olvidó de algunas de sus responsabilidades hacia su monarca, y cuando los nuevos reyes llegaron, fue forzado a irse. Él optó por trasladarse a Praga, en el continente de Europa, llevándose con él sus máquinas de impresión y las páginas que ya habían sido impresas, sus registros y sus instrumentos móviles.

Tycho consiguió mejorar la exactitud de las observaciones científicas. Sus observaciones precisas de un cometa, a diferentes distancias, le mostraron que las esferas no tienen que estar anidadas con la Tierra en el centro. Por lo tanto, él hizo su propio modelo del Universo -un híbrido entre el modelo de Ptolomeo y Copérnico: el Sol y la Luna giran al-



Fig. 5: Diagrama desplegable de Kepler de su Cosmographicum Mysterium (Misterio del Cosmos), publicado en 1596. Su pensamiento de la distribución geométrica del Sistema Solar fue sustituido en la década siguiente por sus arreglos de los planetas de acuerdo con las dos primeras de sus tres leyes del movimiento planetario, un sistema que es válido hasta hoy.

rededor de la Tierra, mientras que los otros planetas giran alrededor del Sol. Tycho todavía tenía círculos, pero a diferencia de Aristóteles, él permitió a los círculos que se cruzaran entre sí.

Valoramos a Tycho principalmente por el tesoro de observaciones de alta calidad de las posiciones entre las estrellas del planeta Marte. Tycho invitó a unirse a él a un joven matemático, Johannes Kepler. Es a través de Kepler que la fama de Tycho es largamente reconocida.

Utilizando Matemáticas: Johannes Kepler de Alemania

Como profesor en Graz, Austria, el joven Johannes Kepler (1571 - 1630) recordaba su infancia interesada en la astronomía, debido al cometa y al eclipse lunar que él había visto. Se dio cuenta de que hay cinco formas sólidas formadas por caras iguales, y pensó que si estos sólidos se anidan y separan por esferas, podrían corresponder a los seis planetas conocidos. Su libro, *Mysterium Cosmographicum* (Misterio del Cosmos), publicado en 1596, contenía uno de los esquemas más bellos de la historia de la ciencia (figura 5). En él, el anidó un icosaedro, un octaedro, un dodecaedro, un tetraedro y un cubo, con veinte, ocho, doce, cuatro y seis lados, respectivamente, para mostrar la distancia de los planetas entonces conocidos. El diagrama, aunque muy bello, es completamente erróneo. Sin embargo, la habilidad matemática de Kepler le valió una entrevista con Tycho.

En 1600, se convirtió en uno de los asistentes de Tycho, e hizo cálculos con los datos que Tycho había acumulado. Después, Tycho fue a una cena formal y bebió abundantemente. Según la historia, el protocolo le impidió levantarse de la mesa, y terminó con un estallido de vejiga. Su muerte rápida y dolorosa fue seguida atentamente en su diario, y está bien documentada.

Pero Kepler no obtuvo los datos de inmediato. Por un lado, los datos eran una de las pocas cosas valiosas que los hijos de Tycho podían heredar, ya que Tycho se había casado con una plebeya y no se le permitió legar bienes reales. Pero Kepler pudo finalmente tener acceso a los datos de Tycho de Marte, y trató de hacer que encajaran sus cálculos. Para hacer sus cálculos precisos, incluso Kepler elaboró su propia tabla de logaritmos.

Los datos que Kepler tenía de Tycho eran de la posición de Marte en el cielo, sobre un fondo de estrellas. Trató de calcular el movimiento que debería ser real alrededor del Sol. Durante mucho tiempo,

trató de encajar en un círculo o en una órbita con forma de huevo, pero él no pudo relacionar las observaciones con suficiente precisión. Finalmente, lo trató con una figura geométrica llamada elipse, una especie de círculo aplastado. ¡Se ajustaba! El descubrimiento es uno de los más grandes en la historia de la astronomía, y aunque Kepler lo aplicó por primera vez para Marte y para otros planetas de nuestro Sistema Solar, nosotros ahora lo aplicamos incluso para los cientos de planetas que hemos descubierto alrededor de otras estrellas.

El libro de Kepler de 1609, *Astronomia Nova* (Nueva astronomía), contenía las dos primeras de sus tres leyes del movimiento:

La primera ley de Kepler: La órbita de los planetas alrededor del Sol son elipses, con el Sol en un de sus focos.



Fig. 6: De Harmonices Kepler Mundi (La armonía del mundo), publicado en 1619.

Mercurio	0.387 AU	0.240 años
Venus	0.723 AU	0.615 años
Tierra	1 AU	1 año
Marte	1.523 AU	1.881 años
Júpiter	5.203 AU	11.857 años
Saturno	9.537 AU	29.424 años

Tabla 1: Distancias desde el Sol y periodos de los planetas en la época de Kepler.

La segunda ley de Kepler: Una línea que une un planeta y el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales.

Una elipse es una curva cerrada que tiene dos puntos clave en ella, que se conocen como focos. Para dibujar su propia elipse, se ponen dos puntos en una hoja de papel, cada uno es un foco. A continuación, tome un pedazo de cuerda más larga que la distancia entre los focos. Péguelos en los focos. A continuación, ponga un lápiz en la cuerda, tirando de ella (tensándola), y suavemente mueva el lápiz de lado a lado. La curva que se genere será un lado de una elipse, es evidente cómo mover el lápiz para dibujar el otro lado. Este experimento con la cuerda muestra uno de los puntos clave que definen una elipse: la suma de las distancias desde el punto de la elipse a cada foco se mantiene constante. Un círculo es un tipo especial de elipse donde los dos puntos están en uno encima del otro.

Kepler mantuvo la búsqueda de armonías en los movimientos de los planetas. Él asoció las velocidades de los planetas con notas musicales, las notas agudas que corresponden a los planetas que se desplazan más rápidamente, concretamente, Mercurio y Venus. En 1619, publicó su obra más importante *Harmonices Mundi* (La armonía de los mundos). En él (figura 6), el incluía no sólo pentagramas con las notas, sino también lo que llamamos su tercera ley del movimiento planetario:

Tercera Ley de Kepler del movimiento planetario: El cuadrado del periodo de la órbita de un planeta alrededor del Sol es proporcional al cubo del tamaño de su órbita.



Fig. 7a: Uno de los dos telescopios supervivientes de Galileo llegaron al Instituto Franklin en Filadelfia en 2009, en su primera visita a los Estados Unidos. Nótese que la parte externa de la lente está cubierta con un anillo de cartón. Al ocultar la parte exterior de la lente, que fue la parte menos precisa, Galileo mejoró la calidad de sus imágenes (Foto: Jay M. Pasachoff).

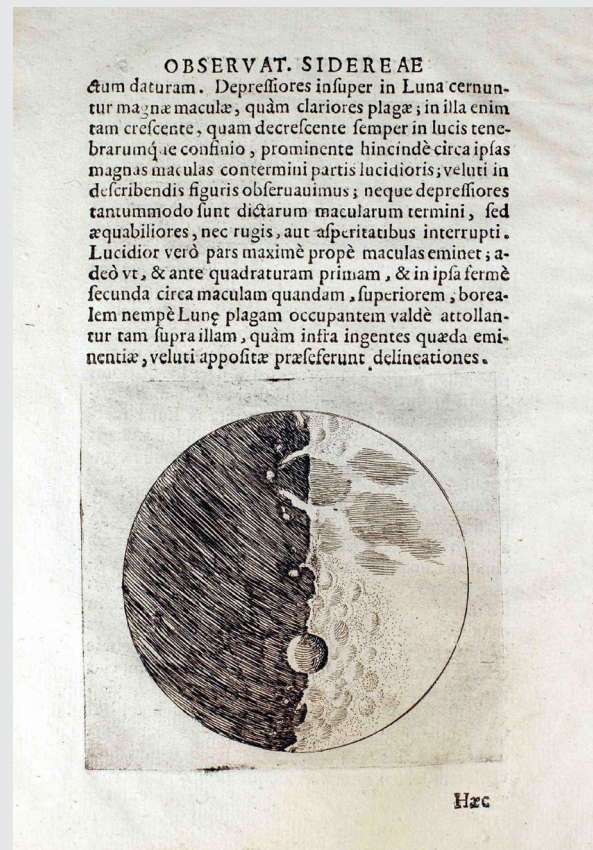


Fig. 7b: Una página del *Sidereus Nuncius* de Galileo (El mensajero de los astros), publicado en 1610, mostrando un grabado de la Luna. El libro fue escrito en latín, la lengua de los eruditos europeos. El libro incluye una amplia cobertura del movimiento relativo de las cuatro lunas principales de Júpiter.

Los astrónomos suelen medir las distancias entre los planetas en términos de las Unidades Astronómicas, que corresponden a la distancia media entre la Tierra y el Sol, o 150 millones de kilómetros.

Elevando al cuadrado la primera columna y al cubo la segunda columna, veremos que son bastante iguales. Las diferencias provienen de la aproximación, no del mundo real, aunque con más decimales las influencias de los otros planetas podrían ser detectadas.

Descubrimientos con el telescopio: Galileo Galilei de Italia

El año 2009 fue el Año Internacional de la Astronomía, declarado por primera vez por la Unión Astronómica Internacional, y luego por la UNESCO, y finalmente por la Asamblea General de las Naciones Unidas. ¿Por qué? Se conmemoró el uso del telescopio en el cielo por Galileo 400 años antes, en 1609.

Galileo (1564-1642) fue profesor en Padua, parte de la República de Venecia. Oyó hablar de un invento holandés que podría hacer que los objetos distantes parecieran estar más cerca. A pesar de que no

había visto ninguno, descubrió lo que las lentes deberían contener y construyó uno. Mostró su dispositivo a los nobles de Venecia como un proyecto militar y comercial, lo que les permitiría ver a los barcos en el mar más lejos que nunca. Su invento fue un gran éxito.

Entonces tuvo la idea de apuntar un telescopio hacia arriba. A pesar de que el telescopio era difícil de usar, tenía un campo de visión muy estrecho, y era difícil de apuntar, él tuvo éxito en ver parte de la Luna y dándose cuenta de que había muchas estructuras en ella. Debido a su formación como pintor en la Italia del Renacimiento, se dio cuenta de que la estructura representaba la luz y la sombra, y que él estaba viendo montañas y cráteres. De la longitud de las sombras y la forma, de cómo se modificaban con la iluminación cambiante del Sol, incluso podía imaginar cuán altas eran. Unos meses antes, el inglés Thomas Harriot había señalado con un telescopio similar a la Luna, pero sólo había dibujado algunos garabatos y dibujos borrosos. Harriot estaba interesado en la publicación o en la gloria, y su obra no se conoció hasta después de su muerte.

Una lente que Galileo utilizó para sus descubrimientos se conserva, agrietada, en el Museo de Historia de la Ciencia en Florencia, Italia, y dos telescopios completos, que han sobrevivido, también están allí (figura 7a).

Galileo comenzó a escribir sus descubrimientos a finales de 1609. Encontró no sólo montañas y cráteres en la Luna, sino también que la Vía Láctea estaba hecha de muchas estrellas, al igual que ciertos asterismos. Luego, en enero de 1610, se encontró con cuatro 'estrellas' cerca de Júpiter que se movían con Júpiter y que cambiaban de posición de noche a noche. Eso marcó el descubrimiento de las lunas principales de Júpiter, que ahora se llaman los satélites galileanos. Él escribió sus descubrimientos en un libro delgado llamado *Sidereus Nuncius* (El mensajero de los astros), que publicó en 1610 (figura 7b). Desde Aristóteles y Ptolomeo, se pensaba que la Tierra era el único centro de revolución. Aristóteles había sido considerado como infalible. Así que el descubrimiento de los satélites de Júpiter, mostrando que Aristóteles pudo haberse equivocado fue un golpe tremendo a la idea geocéntrica, y por lo tanto un punto fuerte a favor de la teoría heliocéntrica de Copérnico. Galileo intentó dar a las lunas el nombre de Cosme de Medici, su patrón, para ganarse su favor. Pero



Fig. 8. En el año 2009, para conmemorar el 400 aniversario del primer uso por Galileo del telescopio en el cielo, una placa fue puesta en una columna en la parte superior del campanario, una torre del siglo XV (re-erigida en el siglo XX después de su colapso en 1902) en Venecia. La conmemoración aquí es de Galileo, demostrando su telescopio a los nobles de Venecia mediante la observación de barcos relativamente lejos en el mar, esto era antes de que él apuntara con su telescopio hacia arriba. La escritura en la placa puede ser traducida aproximadamente como "Galileo Galilei, con su catalejo, el 21 de agosto, de 2009, amplió los horizontes del hombre, hace 400 años." (Foto: Jay M. Pasachoff).

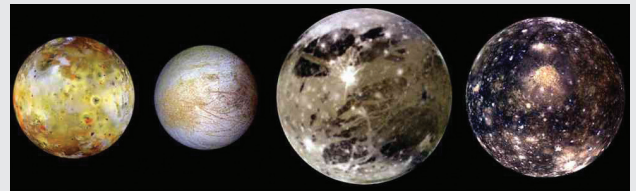


Fig. 9. El propio Galileo habría quedado sorprendido al ver lo que su nave homónima y sus predecesores mostrarán desde los "Medici satélites" que él descubrió en 1609. Aquí muestran en imágenes su verdadera escala relativa. De izquierda a derecha, vemos lo, recientemente resurgió con dos docenas de volcanes en erupción continua. En segundo lugar está Europa, el principal sospechoso para la búsqueda de vida extraterrestre a causa de la mar que se encuentra bajo la capa de hielo suave que vemos. En tercer lugar es Ganímedes, la luna más grande del Sistema Solar, mostrando sobre todo una parte fascinante de su superficie acanalada. Y a la derecha es Calisto, más lejos que los otros y cubierto de hielo duro que conserva las cicatrices de la superposición de impactos de meteoritos que se han producido durante miles de millones de años. (NASA: Misión de Galileo, PIA01400).

esos nombres no se conservaron. Después de unos años, Simon Marius propuso los nombres que se utilizan actualmente. (Marius, incluso pudo haber visto las lunas un poco antes que Galileo, pero lo publicó mucho más tarde.) De izquierda a derecha, son lo, Europa, Ganímedes y Calisto (figura 9). Incluso en un pequeño telescopio de aficionado, se pueden ver en una noche clara, y observar que durante horas se cambian de posición. Ellas orbitan Júpiter en períodos de unos pocos días.

Incluso con los mejores y más grandes telescopios terrestres, los astrónomos no pueden obtener una visión clara de la estructura de la superficie de los satélites galileanos. Sólo cuando la

NASA con los satélites Pioneer 10 y 11, y a continuación, Voyager 1 y 2, voló cerca del sistema de Júpiter vimos con suficiente detalle los satélites como para poder caracterizarlos junto con sus superficies. A partir de observaciones terrestres y espaciales, los astrónomos todavía están descubriendo las lunas de Júpiter, a pesar de que los recién descubiertos son mucho más pequeños y más débiles que los satélites galileanos.

Galileo utilizó sus descubrimientos para conseguir un mejor trabajo con un salario más alto, en Florencia. Por desgracia, Florencia estaba más cerca de la autoridad papal en Roma, sirviendo como banqueros del Papa, y era menos liberal que la República de Venecia. Él continuó escribiendo sobre una variedad de temas científicos, tales como las manchas solares, cometas, cuerpos flotantes. Cada uno parecía señalar un argumento en contra de algún aspecto de los estudios de Aristóteles. Él descubrió que Venus tenía fases – lo que mostró que Venus orbita el Sol. Esto no probó que la Tierra orbitaba el Sol, ya que la cosmología híbrida de Tycho podría explicar estas fases. Sin embargo, Galileo lo vio como una prueba de Copérnico.

En 1616, fue informado por funcionarios de la Iglesia de Roma para que no enseñara el copernicanismo, que el Sol y no la Tierra era el centro del Universo. Se las arregló para guardar silencio durante mucho tiempo, pero en 1632 publicó su *Diálogo (Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo)*, donde había tres hombres que discutían los sistemas geocéntrico y heliocéntrico. Él tenía permiso oficial para publicar el libro, pero el libro hizo evidente su preferencia por el sistema heliocéntrico de Copérnico. Fue juzgado por su desobediencia y fue condenado a arresto domiciliario, donde permaneció por el resto de su vida.

La Nueva Física: Isaac Newton de Inglaterra
Muchos creen que los tres mejores físicos de todos los tiempos son: Isaac Newton, James Clerk Maxwell, y Albert Einstein. Un resumen: Newton descubrió la ley de la gravedad, Clerk Maxwell unificó la electricidad y el magnetismo, y Einstein descubrió la relatividad especial y general.

Según la historia, el joven Isaac Newton (1642-1727) fue enviado a casa desde la Universidad de Cambridge a Woolsthorpe, cerca de Lincoln, en Inglaterra, cuando las universidades inglesas estaban cerradas debido a una plaga. Una vez allí, vio a una manzana caerse del árbol, y se dio cuenta de que la

misma fuerza que controlaba la caída de la manzana era, sin duda, la misma fuerza que controlaba el movimiento de la Luna.

Finalmente, Newton volvió al Trinity College de Cambridge. Mientras tanto, un grupo de científicos en Londres se reunieron en un café para formar una sociedad (en la actualidad la Royal Society), y el joven Edmond Halley fue enviado a Cambridge para conseguir los servicios de un brillante matemático, Isaac Newton, podría ayudarles con una cuestión científica importante. El viaje de Londres a Cambridge en diligencia era mucho más largo y difícil que la hora en tren que se tarda hoy en día.

Halley le preguntó a Newton que si hubiera una fuerza que atrajera según el cuadrado de la distancia, ¿qué forma tendría una órbita? Y Newton contestó que sería una elipse. Emocionado, Halley le preguntó si lo había probado, y Newton dijo que estaba en unos papeles que tenía. Él dijo que no podía encontrarlos, aunque tal vez no hacía más que ganar tiempo de espera para juzgar si realmente quería entregar su análisis. De todos modos, Newton fue invitado a escribir algunas de sus conclusiones matemáticas. En pocos años, todo ello le condujo a su libro más famoso, el *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Principios matemáticos de filosofía natural), donde lo que entonces se llamaba Filosofía incluye lo que hoy llamamos ciencia.

El Principia de Newton apareció en 1687, en América. Newton era todavía un profesor de la universidad entonces, pasó mucho tiempo antes de que él fuera nombrado caballero por su trabajo posterior a la mención inglesa. Halley tuvo que pagar por la impresión del libro de Newton, y él lo defendió, incluso escribió un prólogo. El famoso Principia incluye la ley de Newton que mostraba cómo la gravedad disminuye con el cuadrado de la distancia, y su prueba de leyes de Kepler sobre las órbitas planetarias. El libro también incluye las leyes de Newton del movimiento, claramente se muestran como “leyes”, en latín, mientras que las leyes de Kepler están enterradas en su texto.

Leyes de Newton del movimiento son:

La primera ley del movimiento de Newton: Un cuerpo en movimiento tiende a permanecer en movimiento, y un cuerpo en reposo tiende a permanecer en reposo.

La segunda ley de Newton del movimiento (ver-

sión moderna): fuerza = masa por aceleración

La tercera ley de Newton del movimiento: Por cada acción hay una reacción igual y opuesta.

Newton sentó las bases a través de la física matemática que llevaron a la ciencia a nuestro tiempo moderno.

Continúa la investigación en astronomía

Así como los pueblos antiguos tenían curiosidad sobre el cielo y quisieron encontrar su lugar en el Universo, los astrónomos de la época actual se han basado en los descubrimientos del pasado con la misma motivación. Descubrimientos teóricos y observaciones trasladaron la comprensión de nuestro lugar en el Universo de la visión geocéntrica de Ptolomeo, a la hipótesis heliocéntrica de Copérnico, al descubrimiento de que el Sistema Solar no estaba en el centro de nuestra galaxia, a nuestra comprensión de las galaxias distribuidas por todo el Universo.

La astronomía moderna se enfrenta a la búsqueda de la naturaleza de la materia oscura y la energía oscura. La teoría de la relatividad de Einstein indica que no sólo no es nuestra galaxia el centro del Universo, sino que el "centro" es algo sin sentido. Descubrimientos más recientes de cientos de exoplanetas que orbitan otras estrellas han puesto de manifiesto lo inusual de nuestro Sistema Solar. El camino del descubrimiento muestra que los astrónomos de la época moderna hacen lo mismo que hicieron los astrónomos de miles o cientos de años atrás.

.....

Bibliografía

Hoskin, M. (editor), Cambridge Illustrated History of Astronomy, Cambridge University Press, 1997.
Pasachoff, J and Filippenko A, The Cosmos: Astronomy in the New Millennium, 4th ed., Cambridge University Press 2012.

Fuentes Internet

www.solarcorona.com

<http://www.astrosociety.org/education/resources/multiprint.html>

<http://www2.astronomicalheritage.net>

Sistema Solar

Magda Stavinschi

International Astronomical Union, Instituto Astronómico de la Academia Rumana (Bucarest, Rumania)

.....

Resumen

Sin duda, en un Universo en el que hablamos acerca de los sistemas estelares y solares, de los planetas y de los exoplanetas, el sistema más conocido es el Sistema Solar. ¿Quién no sabe lo que es el Sol, cuáles son los planetas, los cometas, los asteroides? Pero, ¿es esto realmente así? Si queremos saber esto desde el punto de vista científico, tenemos que saber las reglas que definen un sistema.

¿Cuáles son estos cuerpos (de acuerdo con resolución de la Unión Astronómica Internacional, de 24 de agosto de 2006)?

- 8 planetas
- 162 satélites naturales de los planetas
- 3 planetas enanos
- Otros cuerpos más pequeños:
 - o asteroides
 - o meteoritos
 - o cometas
 - o polvo
 - o los objetos del Cinturón de Kuiper
 - o etc.

Por extensión, cualquier otra estrella rodeada por los cuerpos celestes de acuerdo a las mismas leyes se llama sistema estelar. ¿Cuál es el lugar del Sistema Solar en el Universo? Hay sólo un montón de preguntas que tratamos de responder en este capítulo.

Objetivos

- Saber qué lugar ocupa el Sol en el Universo.
 - Conocer que objetos forman el Sistema Solar.
 - Conocer detalles de los diferentes cuerpos del sistema solar, especialmente de los más destacados.
-

Sistema Solar

¿Qué es un sistema?

Un sistema es, por definición, un conjunto de elementos (principios, normas, fuerzas, etc), que interactúan entre sí de acuerdo con una serie de principios o reglas.

¿Qué es un Sistema Solar?

Para definirlo vamos a indicar los elementos del conjunto: el Sol y todos los cuerpos que lo rodean y que están unidos a él por la fuerza de gravedad.

¿Cuál es el lugar del Sistema Solar en el Universo?

El Sistema Solar está situado en uno de los brazos exteriores de nuestra galaxia, también llamada Vía Láctea. Este brazo se llama el brazo de Orión. Está situado en una región de una densidad relativamente pequeña.

El Sol, junto con todo el Sistema Solar, está en un movimiento de revolución alrededor del centro de nuestra galaxia, situado a una distancia de 25.000-28.000 años luz (aprox. la mitad del radio de la galaxia), con un período de revolución de aproximadamente 225-250 millones de años (el año galáctico del Sistema Solar). La distancia a la que viaja a lo largo de esta órbita circular es de aproximadamente 220 km/s, mientras que la dirección está orientada a la posición actual de la estrella Vega.

Nuestra galaxia se compone de aproximadamente 200 mil millones de estrellas, junto con sus planetas, y de más de 1000 nebulosas. La masa de todo el conjunto es aproximadamente 750-1000 mil millones de veces mayor que la del Sol, y el diámetro es de unos 100.000 años luz.

Muy cerca está el sistema de Alfa Centauri (la estrella más brillante de la constelación del Centauro), compuesto de tres estrellas, es decir, un par de estrellas (Alfa Centauri A y B), similar a la del Sol, que gira alrededor de una enana roja, Alfa Centauri C, de una luminosidad relativamente pequeña a una distancia de 0,2 años-luz. La última es la estrella más cercana al Sol, a una distancia de 4,24 años luz es por eso que también se llama "Proxima Centauri".

Nuestra galaxia es parte de un grupo de galaxias llamado Grupo Local, compuesto de tres galaxias grandes y una serie de otras 30 más pequeñas.

Nuestra galaxia tiene la forma de una espiral enorme. Los brazos de esta espiral contienen, entre otras cosas, materia interestelar, nebulosas y estrellas jóvenes que nacen de forma permanente de esa materia. El centro de la galaxia está compuesto por viejas estrellas concentradas en grupos de forma esférica. Nuestra galaxia tiene aproximadamente unos 200 grupos de estos, de los que sólo 150 son más conocidos. Estos grupos se concentran sobre todo en el centro galáctico. Nuestro Sistema Solar está situado a 20 años luz por encima del plano de simetría ecuatorial y 28.000 años luz de distancia desde el centro galáctico.

El centro de la galaxia se encuentra en la dirección de la constelación de Sagitario, a 25.000 - 28.000 años luz de distancia desde el Sol.

El Sol

La edad del Sol es de aproximadamente 4,6 mil millones años. En la actualidad, el Sol ha completado cerca de la mitad de su ciclo de evolución y su núcleo de hidrógeno se transforma en helio a

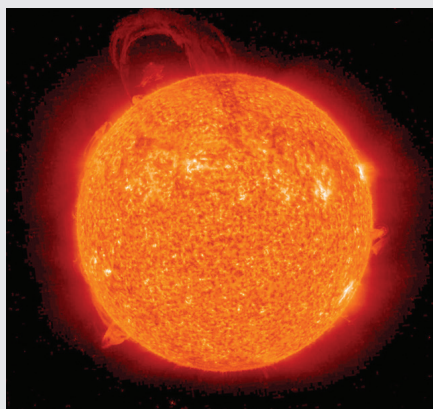


Fig. 1: El Sol.

través de la fusión nuclear. Cada segundo, en el núcleo del Sol, más de cuatro millones de toneladas de materia se convierten en energía, generando así neutrinos y radiación solar.

El ciclo de la vida del Sol

En unos 5 mil millones de años, el Sol se convertirá en una gigante y luego en una enana blanca, un período en el que nacerá una nebulosa planetaria. Por último, se agotará el hidrógeno, que dará lugar a cambios radicales, incluida la destrucción total de la Tierra. La actividad solar, más exactamente su actividad magnética, se detecta a la vista por el número y la dimensión de las manchas en su superficie, así como por las erupciones solares y las variaciones del viento solar, que disipan la materia del Sol en el Sistema Solar e incluso más allá.

La mayor parte del Sol (74%) es hidrógeno, casi el 25% es helio, mientras que el resto son elementos pesados.

La formación y evolución del Sistema Solar

El nacimiento y la evolución del Sistema Solar han generado las teorías más extravagantes. Ni siquiera los descubrimientos de los últimos siglos han logrado acercarnos a la correcta comprensión de estos procesos. La era espacial, el conocimiento de otros mundos similares a nuestro Sistema Solar, así como la física nuclear, nos han ayudado a comprender mejor los procesos fundamentales que tienen lugar dentro de una estrella, que finalmente conducen a la adopción de modelos cercanos a la realidad.

Esta parece ser la hipótesis de una nebulosa primitiva, propuesta en 1755 por Emmanuel Kant y también por separado por Pierre-Simon Laplace. Según esta teoría, el Sistema Solar es el resultado de la acción del efecto de la gravitación en una nube gaseosa llamada nebulosa solar. Esta última tendría un diámetro de aprox. 100 UA y una masa de 2,3 veces mayor que la del Sol. Con el tiempo, una perturbación fuerte (posiblemente una supernova vecina) sacudió la nebulosa, arrojando la materia hacia el interior hasta que las fuerzas gravitacionales sobrepasaron la presión de los gases y el colapso comenzó. Mientras tanto, la nebulosa se estaba viniendo abajo sobre sí misma, aumentando la presión y por lo tanto la temperatura, y la conservación del momento cinético hizo que ésta comenzara a rotar cada vez más rápido. Esto tuvo lugar hace alrededor de 4,6 millones de años. Hoy en día se considera que el Sistema Solar aparece completamente diferente del original. Pero mejor vamos a echar una mirada nuestro sistema planetario tal como es hoy.

Planetas

Para este efecto, se utilizará la definición dada por la Unión Astronómica Internacional (UAI), en su 26a Asamblea General, que tuvo lugar en Praga, en 2006.

En el Sistema Solar, un planeta es un cuerpo celeste que:

1. está en órbita alrededor del Sol,
2. tiene masa suficiente para mantener el equilibrio hidrostático (forma casi redonda), y
3. ha "limpiado la vecindad" alrededor de su órbita.

Un cuerpo no-satélite que cumpla sólo los dos pri-

meros de estos criterios está clasificado como un “planeta enano”.

Según la UAI, los planetas y los planetas enanos son dos clases distintas de objetos. Un no-satélite que cumpla sólo el primer criterio que se denomina un “pequeño cuerpo del Sistema Solar” (SSSB).

Los proyectos iniciales de reclasificación de cuerpos en el Sistema Solar, planearon incluir a los planetas enanos como una subcategoría de los planetas, pero como esto podría haber llevado a la adición de varias decenas de nuevos planetas en el Sistema, este proyecto fue abandonado finalmente. En 2006, sólo se añadieron tres planetas enanos (Ceres, Eris y Makemake) y la reclasificación de uno (Plutón). Así, el Sistema Solar tiene cinco planetas enanos: Ceres, Plutón, Makemake, Haumea y Eris, por el momento.

Según la definición, en la actualidad hay ocho planetas y cinco planetas enanos conocidos en el Sistema Solar. La definición distingue los planetas de los cuerpos más pequeños y no es útil fuera del Sistema Solar, donde los cuerpos más pequeños no se pueden detectar con la tecnología actual. Los planetas extrasolares, o exoplanetas, se tratan por separado en virtud de un proyecto complementario de 2003 de directriz para la definición de los planetas, que los distingue de las estrellas enanas que son más grandes.

Vamos a presentar uno por uno los cuerpos que integran el Sistema Solar:

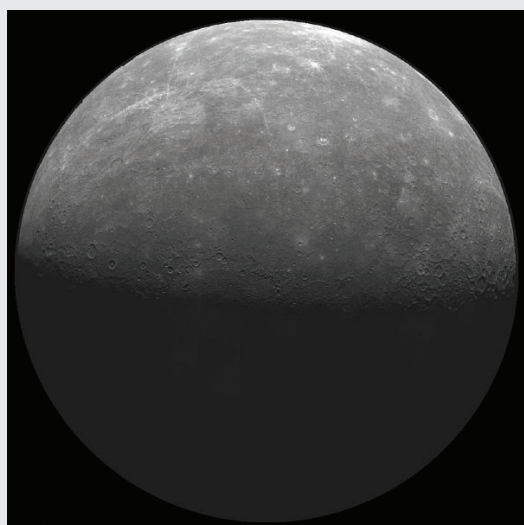


Fig. 2: Mercurio.

¹Un planeta telúrico es un planeta que está compuesto principalmente de rocas de silicato. Dentro del Sistema Solar, los planetas terrestres (o telúricos) son los planetas interiores más cercanos al Sol.

MERCURIO

Mercurio es el planeta más cercano al Sol y el planeta más pequeño del Sistema Solar. Es un planeta telúrico¹ en el interior del Sistema Solar. Recibe su nombre del dios romano Mercurio.

No tiene ningún satélite natural. Es uno de los cinco planetas que pueden verse desde la Tierra a simple vista. Se ha observado con el telescopio sólo desde el siglo XVII. Últimamente, fue estudiado por dos sondas espaciales: Mariner 10 (tres veces en 1974-1975) y Messenger (dos veces en 2008).

Aunque puede ser visto a simple vista, no es fácilmente observable, precisamente porque es el planeta más cercano al Sol. Su lugar en la bóveda celeste se encuentra muy cerca del Sol y se puede también observar sólo alrededor de las elongaciones, un poco antes del amanecer y un poco después del atardecer. Sin embargo, las misiones espaciales nos han dado la información suficiente, lo que muestra sorprendentemente que Mercurio es muy similar a la Luna.

Vale la pena mencionar algunas características del planeta: es el más pequeño del Sistema Solar y el más cercano al sol. Tiene la órbita más excéntrica ($e = 0,2056$) y también la más inclinada en sentido contrario a la eclíptica ($i = 7^\circ 005$). Su período sinódico es de 115,88 días, lo que significa que tres veces al año se sitúa en una posición de máxima elongación oeste del Sol (también se le llama “la estrella de la mañana”, y en las tres posiciones de máxima elongación al este del Sol se llama “la estrella de la tarde”. En cualquiera de estos casos, la elongación no excede los 28° .

Su radio de 2.440 kilómetros hace que sea el planeta más pequeño del Sistema Solar, más pequeño incluso que dos de los satélites galileanos de Júpiter: Ganímedes y Calisto.

La densidad de $5,427 \text{ g/cm}^3$ la convierte en la más espesa después de la de la Tierra ($5,5 \text{ g/cm}^3$). El hierro podría ser el principal elemento pesado (70% contra el 30 y materia rocosa), que contribuye a la gran densidad de Mercurio.

En general, se asegura que Mercurio no tiene atmósfera, lo cual no es correcto pero su atmósfera es muy poco común.

Mercurio es el único planeta (aparte de la Tierra) con un campo magnético significativo, que, aunque es del orden de $1/100$ de la del campo magnético te-

restre, es suficiente para crear una magnetosfera, que se extiende hasta 1,5 radios planetarios, frente a 11,5 radios en el caso de la Tierra. Por último, hay otra analogía con la Tierra: el campo magnético es bipolar, con un eje magnético inclinado 11°, frente al eje de rotación.

Características Orbitales, Época J2000	
Afelio	69.816.900 km, 0,466 697 AU
Perihelio	46.001.200 km, 0,307 499 AU
Semi-eje mayor	57.909.100 km, 0,387 098 AU
Excentricidad	0,205630
Período orbital	87,969 1 días, (0,240846 años), 0,5 día solar de Mercurio
Período sinódico	115,88 días
Velocidad media orbital	47,87 km/s
Anomalía media	174,796°
Inclinación	7,005° sobre la eclíptica
Longitud del nodo ascendente	48,331°
Argumento del perihelio	29,124°
Satélite	Ninguno

Características Físicas	
Radio medio	2.439,7 ± 1,0 km; 0,3829 Tierras
Achatamiento	0
Superfici	7,48 10 ⁷ km ² ; 0,147 Tierras
Volumen	6,083 10 ¹⁰ km ³ ; 0,056 Tierras
Masa	3,3022 10 ²³ kg; 0,055 Tierras
Densidad media	5,427 g/cm ³
Gravedad superficial en el ecuador	3,7 m/s ² ; 0,38 g
Velocidad de escape	4,25 km/s
Período sideral	58,646 d; 1407,5 h
Albedo	0,119 (bond); 0,106 (geom.)
Temperatura de la superficie 0° N, 0° W 85° N, 0° W	Min medio max 100 K 340 K 700 K 80 K 200 K 380 K
Magnitud Aparente	-2,3 a 5,7
Momento angular	4,5" – 13"

En Mercurio las temperaturas varían enormemente. Cuando el planeta pasa por el perihelio, la temperatura puede llegar a 427°C en el ecuador, a mediodía, es decir, suficiente para provocar la fusión de un metal como el zinc. Sin embargo, inmediatamente después de la caída la noche, la temperatura puede bajar a -183°C, lo que hace que el aumento de la variación diurna sea de 610°C!. Ningún otro

planeta sufre una diferencia tan grande, que puede ser debida a la intensa radiación solar durante el día, la ausencia de una atmósfera densa y la duración del día de Mercurio (el intervalo entre el amanecer y el atardecer es de casi tres meses terrestres, es decir, tiempo suficiente para almacenar calor (o, análogamente, frío durante una noche de igual longitud).

Atmósfera:

Traza de la presión en la superficie

Composición:

42% oxígeno molecular, 29,0% sodio, 22,0% hidrógeno, 6,0% helio, 0,5% potasio. Trazas de argón, nitrógeno, dióxido de carbono, vapor de agua, xenón, cryptón y neón.

Tenemos que decir algunas cosas sobre la superficie del planeta

Los cráteres de Mercurio son muy similares a los de la Luna en la morfología, la forma y estructura. El más notable es el de la cuenca de Caloris, testimonio de una gran catástrofe.

Los impactos que generan cuencas son los acontecimientos más catastróficos que pueden afectar la superficie de un planeta. Pueden causar el cambio de la corteza planetaria, e incluso desórdenes internos. Esto es lo que sucedió cuando se formó el cráter Caloris con un diámetro de 1.550 kilómetros.

El avance del perihelio de Mercurio

El avance del perihelio de Mercurio está confirmado. Al igual que cualquier otro planeta, el perihelio de Mercurio no es fijo, sino que tiene un movimiento regular alrededor del Sol. Mucho tiempo se consideró que este movimiento era de 43 segundos de arco por siglo más rápido comparado con las previsiones de la mecánica celeste clásica "newtonianas". Este avance del perihelio fue predicho por la teoría general de la relatividad de Einstein, siendo la causa la curvatura del espacio debido a la masa solar. La coincidencia entre el avance observado del perihelio y el predicho por la relatividad general fue la prueba en favor de la validez de la hipótesis de esta última.

VENUS

Venus es uno de los ocho planetas del Sistema Solar y uno de los cuatro planetas del sistema telúrico en el sistema interno, el segundo en distancia al Sol. Lleva el nombre de la diosa romana del amor y la belleza.

Su cercanía al Sol, la estructura y la densidad de la atmósfera de Venus hace que sea uno de los cuerpos más calientes en el Sistema Solar. Cuenta con un campo magnético muy débil y no tiene satélites naturales. Es uno de los planetas con un movimiento de revolución retrógrada y el único con un período de rotación mayor que el período de la revolución. Es el cuerpo más brillante en la bóveda celeste después del Sol y la Luna.

Es el segundo planeta más distante del Sol (situado entre Mercurio y la Tierra), a aproximadamente



Fig. 3: Venus.

108,2 millones kilómetros del Sol. La trayectoria de Venus alrededor del Sol es casi un círculo: su órbita tiene una excentricidad de 0,0068, es decir, la más pequeña del Sistema Solar. Un año de Venus es algo más corto que un día sideral de Venus, en una proporción de 0,924.

Su tamaño y estructura geológica es similar a la de la Tierra. La atmósfera es muy densa. La mezcla de CO₂ y densas nubes de dióxido de azufre crear el mayor efecto invernadero del Sistema Solar, con temperaturas de aproximadamente 460 °C. La temperatura de la superficie de Venus es mayor que la de Mercurio, aunque Venus se encuentra casi dos veces más alejado del Sol que Mercurio, y

sólo recibe aproximadamente el 25% de la radiación solar que Mercurio. La superficie del planeta tiene un relieve casi uniforme. Su campo magnético es muy débil, pero que arrastra una cola de plasma de 45 millones kilómetros de largo, observada por primera vez por el SOHO en 1997.

Las característica más notable de Venus es su rotación retrógrada; gira alrededor de su eje muy lentamente y en sentido contrario a las agujas del reloj, mientras que los planetas del Sistema Solar lo hace menudo en sentido horario (hay otra excepción: Urano). Su período de rotación se ha conocido sólo de 1962. Esta rotación - lenta y retrógrada - produce días solares mucho más cortos que el día sideral, siendo estos días más largos en los planetas con rotación en sentido horario¹. En consecuencia, hay menos de 2 días completos en un año solar de Venus.

Las causas de la rotación retrógrada de Venus no se han aclarado todavía. La explicación más probable sería una colisión gigante con otro cuerpo de grandes dimensiones en la formación de los planetas del Sistema Solar. También podría ser que la atmósfera de Venus influyera en la rotación

Características Orbitales, Época J2000	
Afelio	108.942.109 km, 0,72823128 AU
Perihelio	107.476.259 km, 0,71843270 AU
Semieje mayor	108.208.930 km, 0,723332 AU
Excentricidad	0,0068
Periodo orbital	224,70069 días, 0,6151970 año, 1,92 Venus día solar
Periodo sinódico	583,92 días
Velocidad orbital media	35,02 km/s
Inclinación	3,39471° sobre elíptica, 3,86° Ecuador del Sol
Longitud del nodo ascendente	76,67069°
Argumento del perihelio	54,85229°
Satélites	Ninguno

Propiedades	Venus	Tierra	Relación Venus/Tierra
Masa	4,8685 10 ²⁴ kg	5,9736 10 ²⁴ kg	0,815
Radio Ecuatorial	6.051 km	6.378 km	0,948
Densidad media	5,204 g/cm ³	5,515 g/cm ³	0,952
Semieje mayor	108.208.930 km	149.597.887 km	0,723
Velocidad orbital media	35,02 km/s	29,783 km/s	1,175
Gravedad superficie	8,87 m/s ²	9,780327 m/s ²	0,906

¹El día solar es el (promedio) intervalo de tiempo entre dos pasos consecutivos del Sol por el meridiano. Por ejemplo, la Tierra tiene un día solar (medio) de 24 h y un día siderio de 23 h 56 m 4,09 s. En Venus el día solar tiene 116,75 días terrestres (116 d 18 h), mientras que el día sidereo es de 243,018 días terrestres.

Características Físicas	
Radio medio	6,051.8 ± 1,0 km, 0,9499 Tierras
Achatamiento	0
Superfíci	4,60 10 ⁸ km ² , 0,902 Tierras
Volumen	9,38 10 ¹¹ km ³ , 0,857 Tierras
Masa	4,8685 10 ²⁴ kg, 0,815 Tierras
Densidad media	5,204 g/cm ³
Gravedad superficial en el ecuador	8,87 m/s ² , 0,904 g
Velocidad de escape	10,46 km/s
Período sideral	-243,0185 d
Albedo	0,65 (geom); 0,75 (bond)
Temperature en la superficie (media)	461,85°C
Magnitud aparente	hasta -4.6 (creciente), -3.8 (lleno)
Momento angular	9.7" – 66.0"

del planeta debido a su gran densidad.

Venus – la hermana gemela de la Tierra. Analogía.

- Nacieron al mismo tiempo, desde el mismo gas y nubes de polvo, hace 4,6 millones de años.

- ambos son planetas del Sistema Solar interno.

- sus superficies tienen un terreno variado: montañas, campos, valles, altiplanos, volcanes, cráteres de impacto, etc.

- ambos tienen un número relativamente pequeño de cráteres, un signo de una superficie relativamente joven y de una atmósfera densa.

- tienen parecidas composiciones químicas.

Tránsito de Venus

El tránsito de Venus se produce cuando el planeta pasa entre la Tierra y el Sol, y la sombra de Venus cruza el disco solar. Debido a la inclinación de la



Fig. 4: La Tierra.

órbita de Venus, frente a la terrestre, este fenómeno es muy raro en nuestra escala de tiempo. Tiene lugar dos veces cada 8 años, a este doble tránsito le separa del siguiente más de un siglo (105,5 y 121,5 años). Los últimos tránsitos tuvieron lugar el 8 de junio de 2004 y el 6 de junio de 2012 y para el siguiente habrá de esperar hasta el 11 de diciembre 2117.

Atmósfera:

Presión en la superficie 93 bar (9,3 MPa)

Composición:

~96,5% dióxido de carbono, ~3,5% nitrógeno, 0,015% dióxido de sulfuro, 0,007% argón, 0,002% vapor de agua, 0,001 7% monóxido de carbono, 0,001 2% helio, 0,000 7% neón.

LA TIERRA

La Tierra es el tercer planeta más distante del Sol en el Sistema Solar, y es el quinto en dimensiones. Per-

Características Orbitales, Época J2000	
Afelio	152.097.701 km; 1,0167103335 AU
Perihelio	147.098.074 km; 0,9832898912 AU
Semi-eje mayor	149.597.887,5 km; 1,0000001124 AU
Excentricidad	0,016710219
Periodo orbital	365,256366 días; 1,0000175 años
Velocidad orbital media	29,783 km/s; 107,218 km/h
Inclinación	1,57869
Longitud del nodo ascendente	348,73936°
Argumento del perihelio	114,20783°
Satélites	1 (la Luna)

Características Físicas	
Radio medio	6.371,0 km
Radio ecuatorial	6.378,1 km
Radio polar	6.356,8 k
Achatamiento	0,003352
Surperfíci	510.072.000 km ²
Volumen	1,0832073 10 ¹² km ³
Masa	5,9736 10 ²⁴ kg
Densidad media	5,515 g/cm ³
Gravedad superficial en el ecuador	9,780327 m/s ² ; 0,99732 g
Velocidad de escape	11.186 km/s
Período sideral	0,99726968 d; 23h 56 m 4,100 s
Albedo	0,367
Temperatura superficial (media)	min medio max -89 °C 14 °C 57,7 °C

tenece a los planetas interiores. Es el planeta telúrico más grande y el único en el Universo conocido donde logró adaptarse la vida. La Tierra se formó aprox. 4,57 mil millones años atrás. Su único satélite natural, la Luna, comenzó su órbita poco después de la de la Tierra, hace unos 4.533 millones años. La edad del Universo es de aproximadamente 13,7 millones de años. 70,8% de la superficie de la Tierra está cubierta de agua, el resto del 29,2% es sólido y "seco". La zona cubierta de agua se divide en los océanos y la tierra se divide en los continentes.

Entre la Tierra y el resto del Universo existe una interacción permanente. Así, la Luna es la causa de las mareas. Además, ha influido de forma continua en la velocidad del movimiento de rotación de la Tierra. Todos los cuerpos del globo terrestre, son atraídos por la Tierra, la fuerza de atracción se llama gravedad y la aceleración con la que estos cuerpos caen en el campo gravitacional se llama aceleración gravitatoria (se denota con una " g " = $9,81 \text{ m/s}^2$). Se cree que la razón de la aparición de los océanos fue una "lluvia" de los cometas en un período temprano de la Tierra. Más tarde, los impactos de asteroides ayudaron a modificar el medio ambiente de manera decisiva. Los cambios en la órbita del planeta pueden considerarse como los responsables de las edades de hielo que tuvieron lugar en la historia, que cubrieron la superficie terrestre con una capa de hielo.

Atmósfera:

Presión en la superficie 101,3 kPa

Composición:

78,08% nitrógeno (N_2), 20,95% oxígeno (O_2), 0,93% argón, 0,038% dióxido de carbono; sobre un 1% vapor de agua (varía con el clima).

MARTE

Marte es el cuarto planeta en distancia al Sol en el Sistema Solar y el segundo en dimensiones después de Mercurio (que es el más pequeño). Pertenecer al grupo de los planetas telúricos. Lleva el nombre del dios romano de la guerra, Marte, debido a su color rojizo. Varias misiones espaciales lo han estudiado desde 1960 para averiguar lo más posible acerca de su geografía, clima, así como otros detalles.

Marte puede ser observado a simple vista. Es menos brillante que Venus y sólo rara vez más brillante que Júpiter. Sobrepasa al último durante sus configuraciones más favorables (oposiciones).

De entre todos los cuerpos del Sistema Solar, el planeta rojo es el que más ha atraído la mayoría de

los autores de ciencia ficción. La razón principal de esto son sus famosos canales, así llamados por primera vez en 1858 por Giovanni Schiaparelli y considerados el resultado de construcciones.

El color rojo de Marte se debe al óxido de hierro III (también llamado hematites), que se encuentra en los minerales en su superficie. Marte tiene un relieve muy abrupto, tiene la montaña más alta del Sistema Solar (el volcán Monte Olympus), con una altura de aprox. 25 km, así como el mayor cañón (Valles Marineris), con una profundidad media de 6 km.

Marte tiene en el centro un núcleo de hierro con un diámetro de aprox. 1.700 kilómetros, cubierto con un manto olivino y una corteza basáltica, con una



Fig. 5: Marte.

anchura media de 50 km. Marte está rodeado por una atmósfera densa, compuesta principalmente de dióxido de carbono. Solía tener una hidrosfera activa, es decir, hubo agua en Marte alguna vez. Tiene dos satélites naturales, Fobos y Deimos, probablemente asteroides capturados por el planeta.

El diámetro de Marte es dos veces menor que el de la Tierra y su superficie es igual a la de los continentes. Su masa es sólo un poco más pequeña que la décima parte de la terrestre. Su masa volumen es la más débil entre los planetas telúricos, lo que hace que su gravedad sea sólo algo menor que la de Mercurio, aunque su masa sea dos veces mayor.

La inclinación del eje de Marte es similar al de la Tierra, es por eso que en Marte hay estaciones como en la Tierra. Las dimensiones de los casquetes polares varían enormemente durante las estaciones a través del intercambio de dióxido de carbono y agua con la atmósfera.

Características Orbitales, Época J2000	
Afelio	249.209.300 km; 1,665861 AU
Perihelio	206.669.000 km; 1,381497 AU
Semi-eje mayor	227.939.100 km; 1,523679 AU
Excentricidad	0,093315
Período orbital	686,971 días; 1,8808 años Julianos
Período sinódico	779,96 días; 2,135 años Julianos
Velocidad orbital media	24,077 km/s
Inclinación	1,850° a la eclíptica; 5,65° al ecuador del Sol
Longitud del nodo ascendente	49,562°
Argumento del perihelio	286,537°
Satélites	2

Características Físicas	
Radio ecuatorial	3.396.2 ± 0.1 km; 0,533 Tierras
Radio polar	3.376.2 ± 0.1 km; 0,531 Tierras
Achatamiento	0,005 89 ± 0,000 15
Superficie	144.798.500 km ² ; 0,284 Tierras
Volumen	1,6318 10 ¹¹ km ³ ; 0,151 Tierras
Masa	6,4185 10 ²³ kg; 0,107 Tierras
Densidad media	3,934 g/cm ³
Gravedad superficial en el ecuador	3,69 m/s ² ; 0,376 g
Velocidad de escape	5,027 km/s
Período sideral	1,025957 d
Albedo	0,15 (geom); 0,25 (bond)
Temperatura superficial	min medio max -87 °C -46 °C -5 °C
Magnitud aparente	+1.8 a -2.91
Diámetro angular	3,5"— 25,1"

Otro punto en común, el día marciano es sólo 39 minutos mayor que el terrestre. Por el contrario, debido a su relativa lejanía del Sol, el año marciano tiene algo más de 322 días que el año terrestre.

Marte es el planeta más cercano exterior a la Tierra. Esta distancia es menor cuando Marte está en oposición, es decir, cuando se encuentra enfrente del Sol, visto desde la Tierra. Dependiendo de elipticidad y de la inclinación de las órbitas, el momento exacto del cierre puede variar en un par de días.

El 27 de agosto de 2003 Marte estaba sólo a 55,758 millones de km de distancia de la Tierra, es decir, a sólo 0,3727 UA, la distancia más pequeña registrada en los últimos 59.618 años. Tal evento, dió paso a todo tipo de fantasías, por ejemplo, que Marte po-

dría haber sido visto tan grande como la Luna. Sin embargo, con un diámetro aparente de 25,13 segundos de arco, Marte puede verse a simple vista como un punto, mientras que la Luna se extiende sobre un diámetro aparente de aprox. 30 minutos de arco. Una cercanía similar tendrá lugar el 28 de agosto 2287, cuando la distancia entre los dos planetas sea de 55.688 millones de km.

Atmósfera:

Presión en la superficie 0,6–1,0 kPa

Composición:

95,72% dióxido de carbono; 2,7% nitrógeno; 1,6% argón; 0,2% oxígeno; 0,07% monóxido de carbono; 0,03% vapor de agua; 0,01% óxido nítrico; 2,5 ppm neón; 300 ppb criptón; 130 ppb formaldeído; 80 ppb xenón; 30 ppb ozono; 10 ppb metano.

JÚPITER

Júpiter es el quinto planeta en distancia al Sol y el más grande de todos los planetas de nuestro Sistema Solar. Su diámetro es 11 veces mayor que el de la Tierra, su masa 318 veces mayor y su volumen de 1300 veces mayor.

- órbita: 778.547.200 kilómetros del Sol
- diámetro: 142.984 kilómetros (Ecuatorial)
- masa: 1.8986 10²⁷ kg

Júpiter es el cuarto objeto más brillante del cielo (tras el Sol, la Luna, Venus y a veces Marte). Se conoce desde tiempos prehistóricos. El descubrimiento de sus cuatro grandes satélites, Io, Europa, Ganimedes y Calisto (conocidos como los satélites galileanos) por Galileo Galilei y Simon Marius en 1610 fue el primer descubrimiento de un centro de movimiento aparente no centrado en la Tierra. Fue un punto importante a favor de la teoría heliocén-



Fig. 6: Júpiter.

trica del movimiento planetario de Nicolás Copérnico. La comprobación por Galileo de la teoría del movimiento de Copérnico le trajo problemas con la Inquisición. Antes de las misiones Voyager, se conocían sólo 16 de sus satélites.

La composición de Júpiter tiene probablemente un núcleo de material sólido, que asciende hasta 10 o incluso 15 veces la masa de la Tierra. Por encima de este núcleo está la parte principal del planeta, compuesta de hidrógeno metálico líquido. Debido a la temperatura y la presión dentro de Júpiter, el hidrógeno es un líquido y no un gas. Esto es un conductor eléctrico y la fuente del campo magnético de Júpiter. Esta capa contiene algo de helio y algunos restos de “deriva de hielo”.

La capa de la superficie está compuesta principalmente de hidrógeno molecular y helio, líquido dentro y gaseoso fuera. La atmósfera que vemos es sólo la parte superior de esta profunda capa. El agua, el dióxido de carbono, el metano, así como otras moléculas simples también están presentes en pequeñas cantidades.

La atmósfera de Júpiter se compone de aprox. 86% de hidrógeno y helio 14% (según el número de átomos, aprox. 75/25% en masa) con rastros de metano, agua, amoníaco y “piedra”. Esto es muy parecido a la estructura original de la nebulosa solar, de la que todo el Sistema Solar se formó. Saturno tiene una composición similar, mientras que Urano y Neptuno tienen menos hidrógeno y helio.

La Gran Mancha Roja (GRS) se observó por primera vez por los telescopios terrestres, más de 300 años atrás. Es un óvalo de aproximadamente 12.000 por 25.000 kilómetros, lo suficientemente grande como para abarcar dos Tierras. Es una región de alta presión, cuyas nubes superiores son mucho más altas y más frías que las zonas circundantes. Estructuras similares se han observado en Saturno y Neptuno. La forma en que este tipo de estructuras resisten tanto tiempo no se ha dilucidado aún.

En Júpiter y otros planetas gaseosos soplan vientos a gran velocidad en grandes bandas de latitud. Los vientos soplan en direcciones opuestas en dos bandas adyacentes. La temperatura de las pequeñas o las diferencias de composición química son responsables de la diferente coloración de las bandas, un aspecto que domina la imagen del planeta. La atmósfera de Júpiter es muy turbulenta. Esto demuestra que los vientos son impulsados,

en gran medida, por el calor interno del planeta y que no provienen del Sol, como pasa en la Tierra.

La Magnetosfera de Júpiter tiene un campo magnético enorme, 14 veces más fuerte que el de la Tierra. Su magnetosfera se extiende sobre unos 650 millones de km (más allá de la órbita de Saturno). Los satélites de Júpiter se incluyen en su atmósfera, lo que explica parcialmente la actividad en lo. Un gran inconvenien-

Características Orbitales, Época J2000	
Afelio	816.520.800 km (5,458104 AU)
Perihelio	740.573.600 km (4,950429 AU)
Semi-eje mayor	778.547.200 km (5,204267 AU)
Excentricidad	0,048775
Periodo orbital	4,331572 días; 11,85920 años; 10,4758 días solares de Júpiter
Periodo sinódico	398,88 días
Velocidad orbital media	13,07 km/s
Anomalía media	18,818°
Inclinación	1,305° de la eclíptica; 6,09° del ecuador del Sol
Longitud del nodo ascendente	100,492°
Argumento del perihelio	275,066°
Satélites	63

Características Físicas	
Radio ecuatorial	71.492 ± 4 km; 11,209 Tierras
Radio polar	66,854 ± 10 km; 10.517 Tierras
Achatamiento	0,06487 ± 0,00015
Superfici	6,21796 10 ¹⁰ km ² ; 121,9 Tierras
Volumen	1,43128 10 ¹⁵ km ³ ; 1.321,3 Tierras
Masa	1,8986 10 ²⁷ kg; 317,8 Tierras; 1/1047 Sol
Densidad media	1,326 g/cm ³
Gravedad superficial en el ecuador	24,79 m/s ² ; 2,528 g
Velocidad de escape	59,5 km/s
Período sidereal	9,925 h
Albedo	0,343 (bond); 0,52 (geom.)
Magnitud aparente	-1.6 a -2.94
Diámetro angular	29.8" — 50.1"

te para los viajes espaciales del futuro, así como un problema para los diseñadores de las sondas Voyager y Galileo, es que en el medio circundante de Júpiter hay grandes cantidades de partículas capturadas por el campo magnético de Júpiter. Esta “radiación” es similar, pero mucho más intensa que la observada en los cinturones de Van Allen de la Tierra. Sería letal para

cualquier ser humano sin protección.

La sonda Galileo descubrió una radiación nueva e intensa entre los anillos de Júpiter y los estratos superiores de la atmósfera. Este nuevo cinturón de radiación tiene una intensidad de aprox. 10 veces mayor que la de los cinturones de Van Allen en la Tierra. Sorprendentemente, este nuevo cinturón contiene iones de helio de alta energía, de origen desconocido.

Júpiter tiene anillos como Saturno, pero mucho más escuálidos y pequeños. A diferencia de los de Saturno, los anillos de Júpiter son oscuros. Es probable que se compongan de pequeños granos de material rocoso. A diferencia de los anillos de Saturno, éstos no parecen contener hielo. Probablemente, las partículas de los anillos de Júpiter no permanecen allí por mucho tiempo (a causa de la atmósfera y la atracción magnética). La sonda Galileo encontró pruebas claras que indican que los anillos son continuamente alimentados por el polvo formado por los impactos de los micro meteoritos con el interior, que son muy energéticos, debido al tamaño del campo gravitacional de Júpiter.

Atmósfera:

Presión en la superficie 20–200 kPa (capas de nubes)

Composición:

89,8±2,0% hidrogeno (H₂), 10,2±2,0% helio, ~0,3% metano, ~0,026% amoniaco, ~0,003% hidrogeno deuterio (HD), 0,0006% etano, 0,0004% agua. Hielos de: amoniaco, agua, hidrosulfuro de amonio (NH₄SH).

SATURNO

Saturno es el sexto planeta más distante del Sol en el Sistema Solar. Es un planeta gigante gaseoso, el segundo en masa y volumen después de Júpiter. Tiene un diámetro aproximado de nueve veces mayor que el de la Tierra y está compuesto sobre todo de hidrógeno. Lleva el nombre del dios romano Saturno.

Masa y dimensiones: Saturno tiene la forma de esferoide aplanado: es achatado en los polos e hinchado en el ecuador. Su diámetro ecuatorial y polar difieren aprox. en un 10%, como consecuencia de su rápida rotación alrededor de su eje y de una composición interna muy fluida. Los otros planetas gaseosos gigantes del Sistema Solar (Júpiter, Urano, Neptuno) también son aplanados, pero menos evidente.

Saturno es el segundo planeta más masivo del Sis-

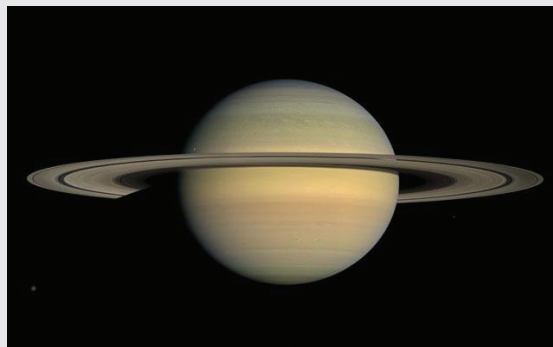


Fig. 7: Saturno.

tema Solar, 3,3 veces más pequeño que Júpiter, pero 5,5 más grande que Neptuno y 6,5 veces más grande que Urano. Es 95 veces más masivo que la Tierra. Su diámetro es de casi 9 veces mayor que el de la Tierra.

Saturno es el único planeta del Sistema Solar, cuyo promedio masa-volumen es menor que la del agua: 0,69 g/cm. Esto significa que su atmósfera, compuesta sobre todo de hidrógeno, es menos densa que el agua, pero su núcleo es mucho más denso.

Características Orbitales, Época J2000	
Afelio	1.513.325.783 km; 10,11595804 AU
Perihelio	1.353.572.956 km; 9,04807635 AU
Semi-eje mayor	1.433.449.370 km; 9,58201720 AU
Excentricidad	0,055723219
Período orbital	10.759.22 días; 29,4571 año
Período sinódico	378,09 días
Velocidad media orbital	9,69 km/s
Anomalía media	320,346750°
Inclinación	2,485240° a la eclíptica; 5,51° al ecuador del Sol
Longitud del nodo ascendente	113,642811°
Argumento del perihelio	336,013862°
Satélites	~ 200 observados (61 con órbita fija)

La atmósfera:

Al igual que Júpiter, la atmósfera de Saturno se organiza en bandas paralelas, aunque estas son menos visibles y más grandes en el ecuador. En realidad, los sistemas de nubes de Saturno (así como las tormentas de larga duración) fueron observadas por primera vez por las misiones Voyager. La nube observada en 1990 es un ejemplo de una mancha blanca grande, un fenómeno efímero de Saturno que tiene lugar cada 30 años. Si la periodicidad sigue siendo la misma, la próxima tormenta tendrá

Características Físicas	
Radio ecuatorial	60.268 ± 4 km; 9,4492 Tierras
Radio polar	54.364 ± 10 km; 8,5521 Tierras
Achatamiento	0,09796 ± 0,00018
Superfici	4,27 10 ¹⁰ km ² ; 83,703 Tierras
Volumen	8,2713 10 ¹⁴ km ³ ; 763,59 Tierras
Masa	5,6846 10 ²⁶ kg; 95,152 Tierras
Densidad media	0,687 g/cm ³ ; (menor que el agua)
Gravedad superficial en el ecuador	10,44 m/s ² ; 1,065 g
Velocidad de escape	35,5 km/s
Período sideral	10,57 horas; (10 h 34 m)
Velocidad de rotación ecuatorial	9,87 km/s; 35.500 km/h
Inclinación axial	26,73°
Albedo	0,342 (bond); 0,47 (geom.)
Magnitud aparente	+1.2 a -0.24
Diámetro angular	14,5" — 20,1" (excluidos los anillos)

lugar probablemente en 2020.

En 2006, la NASA observó una tormenta de las dimensiones de un huracán, estacionado en el polo Sur, que tenía un ojo bien definido. Es el único ojo observado en otro planeta salvo en la Tierra.

La atmósfera de Saturno se somete a una rotación diferencial.

Los anillos de Saturno: dan uno de los espectáculos más hermosos del Sistema Solar, que constituyen su principal característica. A diferencia de los otros dos planetas gaseosos gigantes, que son muy brillantes (albedo de entre 0,2 y 0,6), los anillos de Saturno pueden verse a través de un par de binoculares. Poseen una actividad permanente: colisiones, acumulaciones de materia, etc

Saturno tiene un gran número de satélites. Es difícil decir cuántos hay, cualquier trozo de hielo de los anillos se puede considerar un satélite. En 2009 se identificaron 62 satélites. 53 fueron confirmados y se les dio nombres. La mayoría de ellos son pequeños: 31 tienen un diámetro de menos de 10 km, mientras que 13 son de menos de 50 km. Sólo siete son lo suficientemente grandes para asumir una forma esférica bajo la influencia de su propia gravedad. Titán es el mayor de ellos, más grande que Mercurio y Plutón y el único satélite del Sistema Solar con una atmósfera densa.

Atmósfera:

Escala de altura: 59,5 km

Composición:

~96% hidrógeno (H₂), ~3% helio, ~0,4% metano,

~0,01% amoníaco, ~0,01% Deuterio de hidrógeno (HD), 0,000 7% etano, hielo de: amoníaco, agua, hidrosulfuro de amonio ((NH₄SH).

URANO

Urano es un planeta gigante gaseoso. Es el séptimo más alejado del Sol en el Sistema Solar, el tercero en dimensiones y el cuarto en masa. Lleva el nombre del padre de Cronos (Saturno) y del abuelo de Zeus (Júpiter). Es el primer planeta descubierto en la época moderna. Aunque puede ser visto a simple vista como los otros 5 planetas clásicos, debido a su débil luminosidad que no era fácilmente identificable como planeta. William Herschel anunció su descubrimiento el 13 de marzo de 1781, ampliando así las fronteras del Sistema Solar por primera vez en la época moderna. Urano es el primer planeta descubierto por medio del telescopio.

Urano y Neptuno tienen composiciones internas y atmosféricas diferentes de la de los otros grandes planetas gaseosos, Júpiter y Saturno. Por eso, los astrónomos a veces los colocan en una categoría diferente, la de los gigantes helados o subgigantes.

La atmósfera de Urano, aunque se compone principalmente de hidrógeno y helio, también contienen grandes cantidades de hielo de agua, amoníaco y metano, así como huellas de hidrocarburos. Urano presenta la atmósfera más fría del Sistema Solar, que alcanza un mínimo de -224 C. Tiene una estructura compleja de nubes, las de los estratos más bajos podrían estar formados de

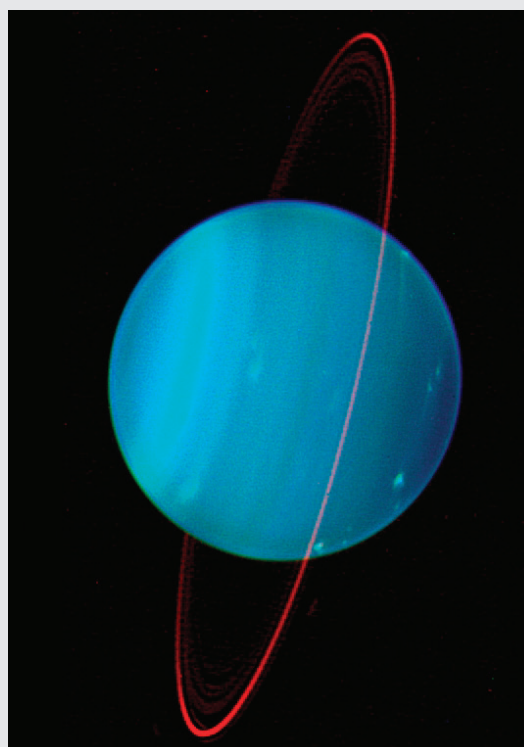


Fig. 8 Urano.

agua y en los estratos superiores de metano. Como los otros planetas gigantes gaseosos, Urano tiene un sistema de anillos, una magnetosfera y numerosos satélites naturales. El sistema de Urano es único en el Sistema Solar, porque su eje de rotación está prácticamente en la órbita de su plano de revolución alrededor del Sol. Sus polos Norte y Sur están donde los otros planetas tienen su ecuador. En 1986, la Voyager 2 dio imágenes de Urano, que muestran un planeta sin características especiales en la luz visible, sin capas de nubes o nubes como en los otros planetas gaseosos. Sin embargo, observaciones recientes han mostrado signos de cambio de estación y un aumento de la actividad meteorológica, cuando Urano se acercaba a su equinoccio de diciembre de 2007. El viento puede alcanzar la velocidad de 250 m/s en su superficie.

Órbita y rotación: El período de revolución de Urano alrededor del Sol es de 84 años terrestres. Su distancia media al Sol es de aprox. 3 mil millones de kilómetros. La intensidad del flujo solar en Urano es de aprox. 1/400 de la que recibe la Tierra.

El período de rotación de las capas interiores de Urano es de 17 horas y 14 minutos. Sin embargo, en la atmósfera superior tienen lugar vientos violentos en el sentido de rotación, como ocurre con todos los planetas gigantes gaseosos. En consecuencia, alrededor de los 60° de latitud, las partes visibles de la atmósfera viajan más rápido y hacen una rotación completa en menos de 14 horas.

Urano es un planeta gigante, como Júpiter, Saturno y Neptuno. Aunque sabemos muy pocas cosas acerca de su composición interna, sabemos con certeza que es diferente de la de Júpiter o Saturno. En teoría, debería tener un núcleo sólido de silicatos de hierro, con un diámetro de aprox. 7.500 km, rodeado por un escudo formado por hielo de agua mezclado con helio, metano y amoníaco, de 10.000 km de ancho, seguido de un estrato superficial de hidrógeno y helio líquido, de aprox. 7.600 kilómetros, que se derrite lentamente en la atmósfera. A diferencia de Júpiter y Saturno, Urano no es tan masivo como para conservar el hidrógeno en estado metálico alrededor de su núcleo.

El color verde azulado se debe a la presencia de metano en la atmósfera, que absorbe todo el rojo y el infrarrojo.

Urano tiene al menos 13 anillos principales.

Características Orbitales, Época J2000	
Afelio	3.004.419.704 km, 20,08330526 AU
Perihelio	2.748.938.461 km, 18,37551863 AU
Semi-eje mayor	2.876.679.082 km, 19,22941195 AU
Excentricidad	0,044405586
Periodo orbital	30.799.095 días, 84.323.326 años
Periodo sinódico	369,66 días
Velocidad orbital media	6,81 km/s
Anomalía media	142,955717°
Inclinación	0,772556° a la eclíptica, 6,48° al Ecuador del Sol
Longitud del nodo ascendente	73,989821°
Argumento del perihelio	96,541318°
Satélites	27

Características Físicas	
Radio ecuatorial	25.559 ± 4 km, 4,007 Tierras
Radio polar	24.973 ± 20 km, 3,929 Tierras
Achatamiento	0,0229 ± 0,0008
Superficie	8,1156 10 ⁹ km ² , 15,91 Tierras
Volumen	6,833 10 ¹³ km ³ , 63,086 Tierras
Masa	(8,6810 ± 0.0013) 10 ²⁵ kg, 14,536 Tierras
Densidad media	1,27 g/cm ³
Gravedad superficial en el ecuador	8,69 m/s ² , 0,886 g
Velocidad de escape	21,3 km/s
Período sidereal	-0,71833 d, 7 h 14 m 24 s
Velocidad de rotación ecuatorial	2,59 km/s, 9.320 km/h
Inclinación axial	97,77°
Albedo	0,300 (bond), 0,51 (geom.)
Magnitud aparente	5,9 a 5,32
Diámetro angular	3,3"– 4,1"

A diferencia de cualquier otro planeta del Sistema Solar, Urano presenta un eje de rotación muy inclinado, casi paralelo a su plano orbital. Podríamos decir que rueda en su órbita y expone al Sol su polo Norte y su polo Sur sucesivamente.

Una consecuencia de esta orientación es que las regiones polares reciben más energía del Sol que las ecuatoriales. Sin embargo, Urano permanece más cálido en el ecuador que en los polos, un mecanismo aún no explicado.

Ninguna teoría sobre su inclinación puede pasar por alto la idea de una colisión catastrófica con otro cuerpo antes de su formación actual.

Urano tiene al menos 27 satélites naturales. Los dos primeros fueron descubiertos por William Herschel el 13 de marzo de 1787 y fueron llamados Titania y Oberón.

Atmósfera:

Composición:

(por debajo 1,3 bar): $83 \pm 3\%$ hidrógeno (H_2), $15 \pm 3\%$ helio, 2,3% metano, 0,009% (0,007–0,015%) deuterio de hidrógeno (HD). Hielos de: amoníaco, agua, hidrosulfuro de amonio (NH_4SH), metano (CH_4).

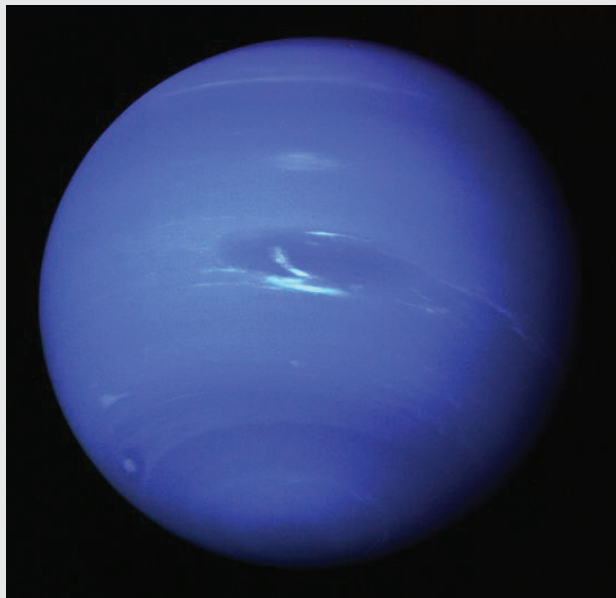


Fig. 9: Neptuno.

NEPTUNO

Neptuno es el octavo y el planeta más alejado del Sol en el Sistema Solar. Es también el último planeta gigante gaseoso.

Fue descubierto por el astrónomo alemán Johann Gottfried Galle, el 23 de septiembre de 1847, siguiendo las indicaciones de Urbano Le Verrier, quien, como el astrónomo inglés John Couch Adams, había previsto a través del cálculo, que en esa región del cielo, podía ser encontrado. Lleva el nombre del dios romano de los mares, Neptuno.

Neptuno no es visible a simple vista y aparece

como un disco de color verde azulado a través del telescopio. Ha sido visitado sólo una vez por la sonda espacial Voyager 2, que pasó cerca de él el 25 de agosto de 1989. Su satélite mayor es Tritón.

Su composición interna es similar a la de Urano. Se cree que tiene un núcleo sólido formado de silicatos y hierro, casi tan grande como la masa de la Tierra. Su núcleo, al igual que Urano, está supuestamente cubierto con una composición bastante uniforme (rocas en fusión, hielo, el 15% de hidrógeno y algo de helio), no tiene ningún tipo de estructura en “capas” como Júpiter y Saturno.

Características Orbitales, Época J2000	
Afelio	4.553.946.490 km, 30,44125206 AU
Perihelio	4.452.940.833 km, 29,76607095 AU
Semi-eje mayor	4.503.443.661 km, 30,10366151 AU
Excentricidad	0,011214269
Período orbital	60,190 días, 164.79 años
Período sinódico	367,49 día
Velocidad orbital media	5,43 km/s
Anomalía media	267,767281°
Inclinación	1,767975° a la eclíptica, 6,43° al Ecuador del Sol
Longitud del nodo ascendente	131,794310°
Argumento del perihelio	265,646853°
Satélites	13

Características Físicas	
Radio ecuatorial	24.764 ± 15 km, 3,883 Tierras
Radio polar	24.341 ± 30 km, 3,829 Tierras
Achatamiento	$0,0171 \pm 0,0013$
Superfici	$7,6408 \cdot 10^9$ km ² , 14,98 Tierras
Volumen	$6,254 \cdot 10^{13}$ km ³ , 57,74 Tierras
Masa	$1,0243 \cdot 10^{26}$ kg, 17,147 Tierras
Densidad media	1,638 g/cm ³
Gravedad superficial en el ecuador	11,15 m/s ² , 1,14 g
Velocidad de escape	23,5 km/s
Período sideral	0,6713 d, 16 h 6 m 36 s
Velocidad de rotación ecuatorial	2,68 km/s, 9.660 km/h
Inclinación axial	28,32°
Albedo	0,290 (bond); 0,41 (geom.)
Magnitud aparente	8,0 a 7,78
Diámetro angular	2,2”– 2,4”

Su color azulado proviene principalmente del metano, que absorbe la luz en las longitudes de onda del rojo. Parece que otra composición da a Neptuno su característico color azulado, pero que no se ha definido todavía.

Como los otros planetas gigantes gaseosos, tiene un sistema eólico formado de vientos muy rápidos en bandas paralelas al ecuador, de fuertes tormentas y vórtices. Los vientos más rápidos en Neptuno soplan a más de 2.000 km/h.

Durante la visita de la Voyager 2, la formación más interesante observada fue la "Gran Mancha Oscura", que podría ser del tamaño de la "Gran Mancha Roja" de Júpiter. No se advirtió antes, durante las observaciones realizadas con el telescopio espacial Hubble. Los vientos pueden soplar allí a 300 m/s (1.080 km/h) o incluso hasta 2.500 km/h. Esta mancha podría ser un huracán gigante oscuro que supuestamente viaja a unos 1.000 km/h.

Los anillos planetarios de Neptuno son poco visibles. Son oscuros, y su origen es aún desconocido.

Neptuno tiene al menos 13 satélites naturales, entre los cuales el más importante es Tritón, descubierto por William Lassell sólo 17 días después del descubrimiento de Neptuno.

Atmósfera:

Composición:

$80 \pm 3,2\%$ hidrógeno (H_2), $19 \pm 3,2\%$ helio, $1,5 \pm 0,5\%$ metano, $\sim 0,019\%$ hidrógeno deuterio (HD), $\sim 0,00015$ Etano. Hielos de: amoníaco, agua, hidrosulfuro de amonio (NH_4SH), metano.

Otros Cuerpos en el Sistema Solar

El medio interplanetario

Además de la luz, el Sol irradia un flujo continuo de partículas cargadas (plasma) llamado viento solar. Este flujo se disipa a una velocidad de 1,5 millones de km/h, creando así la heliosfera, una fina atmósfera que baña el Sistema Solar hasta aprox. 100 UA (marcado la heliopausa). La materia que constituye la heliosfera se llama medio interplanetario. El ciclo solar de 11 años, así como las frecuentes erupciones solares y eyecciones de masa coronal, perturban la heliosfera y crear un clima espacial. La rotación del campo magnético solar actúa sobre el medio interplanetario, creando la capa de heliosférica actual, que es la mayor estructura del Sistema Solar.

El campo magnético terrestre protege a la atmósfera del viento solar. La interacción entre el viento

solar y el campo magnético terrestre provoca las auroras boreales.

La heliosfera asegura una protección parcial del Sistema Solar de los rayos cósmicos, que es mayor en los planetas con un campo magnético.

El medio interplanetario tiene al menos dos regiones de polvo cósmico bajo la forma de disco. La primera, la nube de polvo zodiacal, está en el Sistema Solar interior y produce la luz zodiacal. Probablemente se formó a través de una colisión en el interior del cinturón de asteroides causado por las interacciones con los planetas. La segunda se extiende entre 10 y 40 UA y probablemente se formó durante colisiones similares en el Cinturón de Kuiper.

EL CINTURON DE ASTEROIDES

Los asteroides son principalmente pequeños cuerpos del Sistema Solar formados por rocas y minerales metálicos no volátiles. El cinturón de asteroides ocupa una órbita situada entre Marte y Júpiter, a una distancia de 2,3 y hasta 3,3 UA del Sol. Podrían ser restos del Sistema Solar en formación, que no han logrado hacer un cuerpo celeste mayor, debido a las interferencias gravitatoria de Júpiter.

El tamaño de los asteroides varía entre varios cientos de kilómetros hasta microscópicas motas de polvo. Todos, excepto el más grande, Ceres, se consideran pequeños cuerpos, aunque algunos de ellos como Vesta y Hygeia podrían ser clasificados como planetas enanos, si se demuestra que alcanzan equilibrio hidrostático.



Fig. 10: Cometa Halley

El cinturón de asteroides contiene miles, incluso millones de cuerpos con un diámetro de más de un kilómetro. Sin embargo, la masa total del cinturón

no es mayor que la milésima parte de la de la Tierra.

Ceres (2,77 UA) es el mayor cuerpo en el cinturón de asteroides y el único planeta enano (clasificado así en 2006). Con un diámetro de casi 1.000 km, es suficiente para su gravedad le confiera su forma esférica.

COMETAS

Los cometas son pequeños cuerpos del Sistema Solar, con diámetros del orden de kilómetros, generalmente compuestos de hielos volátiles. Tienen órbitas muy excéntricas, con el perihelio a veces en el Sistema Solar interior, mientras que el afelio está más allá de Plutón. Cuando un cometa entra en el Sistema Solar interior, su proximidad al Sol lleva a la sublimación e ionización de su superficie, creando una cola: una larga cola formada de gas y polvo.

Cometas de período corto (por ejemplo, el cometa Halley) completan su órbita en menos de 200 años y parece que se originan en el Cinturón de Kuiper. Cometas de periodo largo (por ejemplo, el cometa Hale-Bopp) tienen una periodicidad de varios miles de años y parecen originarse en la nube de Oort. Por último, hay algunos cometas que tienen una trayectoria hiperbólica y parecen provenir de fuera del Sistema Solar. Cometas viejos que han perdido la mayor parte de sus componentes volátiles se consideran hoy asteroides.

Los Centauris, situados entre las 9 y 30 UA, son cuerpos de hielo similar a los cometas, que orbitan

Algunos astrónomos clasifican a los centauros como cuerpos del cintuón de Kuiper.

El cinturón de Kuiper es un gran anillo formado por los desechos provenientes de los escombros de un gran anillo, similar a la del cinturón de asteroides, pero se compone principalmente de hielo. La primera parte del cinturón de Kuiper se extiende entre 30 y los 50 UA del Sol y se detiene en "el acantilado Kuiper", donde comienza su segunda parte hasta 100 UA. Esta región se cree que es la fuente de cometas de corto período. Se componen principalmente de los pequeños cuerpos, así como de algunos más grandes, como Quaoar, Varuna o Orcus, que pueden ser clasificados como planetas enanos.

El cinturón de Kuiper podría dividirse mayormente en los objetos "clásicos" y los objetos en resonancia con Neptuno. Un ejemplo en este efecto serían los plutinis que completan dos órbitas mientras que Neptuno ha completado tres.

PLUTÓN Y CARONTE

Plutón (39 UA de distancia media), un planeta enano, es el mayor cuerpo del cinturón de Kuiper conocido. Descubierta en 1930, fue considerado un planeta y reclasificado en agosto de 2006. Plutón tiene una órbita excéntrica inclinada 17° en contra de su plano eclíptico. Su perihelio se extiende hasta las 29,7 UA y el afelio hasta las 49,5 UA.

El satélite más grande de Plutón, Caronte, es lo suficientemente grande para que el conjunto graveite entorno a un centro de gravedad situado por encima de la superficie de cada uno de los cuerpos. Otros dos pequeños satélites, Nix e Hidra, orbitan entorno a la pareja Plutón-Caronte. Plutón está en resonancia orbital de 3:2 con Neptuno (el planeta orbita dos veces el Sol, mientras Neptuno lo hace tres). Los cuerpos de cinturón de Kuiper que participan en esta resonancia se llaman plutinis (es decir pequeños Plutos).



Fig. 11: Plutón y los Planetas Enanos.

entre Júpiter y Neptuno. El mayor centauro conocido, Chariklo, tiene un diámetro de entre 200 y 250 km. El primer centauro descubierto, Quirón, fue considerado en un principio un cometa, ya que desarrolló una cola como estos.

Bibliografia

- Collin, S, Stavinschi, M., Leçons d'astronomie, Ed. Ars Docendi, 2003.
- Kovalevsky, J, Modern Astrometry, Springer Verlag, 2000.
- Nato A., Advances in Solar Research at eclipses, from ground and from space, eds. J.P. Zahn, M.
- Stavinschi, Series C: Mathematical and Physical Sciences, vol. 558, Kluwer Publishing House, 2000. - -
- Nato A, Theoretical and Observational Problems Related to Solar Eclipses, eds. Z. Mouradian, M. Stavinschi, Kluwer, 1997.

Horizonte local y Relojes de Sol

Rosa M. Ros

International Astronomical Union, Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España)

Resumen

El estudio del horizonte es fundamental para poder facilitar las primeras observaciones de los alumnos en un centro educativo. Un simple modelo, que debe realizarse para cada centro, nos permite facilitar el estudio y la comprensión de los primeros instrumentos astronómicos. El modelo construido se presenta a su vez como un sencillo modelo de reloj ecuatorial y a partir de él se pueden construir otros modelos (horizontal y vertical).

Objetivos

- Comprender el movimiento diurno y movimiento anuo del Sol.
- Comprender el movimiento de la bóveda celeste.
- Comprender la construcción de un reloj de Sol elemental.

La Tierra rota y se traslada

Como es bien sabido la Tierra gira sobre su eje lo que da lugar al día y la noche. El eje de esta rotación es el que los antiguos astrónomos llamaban el eje del mundo ya que a todos nosotros nos parece que el cielo gira en torno a este eje (el cielo de día y el cielo de noche). Pero además la Tierra tiene un movimiento de traslación según una elipse con el Sol en uno de sus focos, pero en primera aproximación podemos suponer que es un movimiento circular (ya que la excentricidad de la elipse es casi nula, es decir es casi una circunferencia).

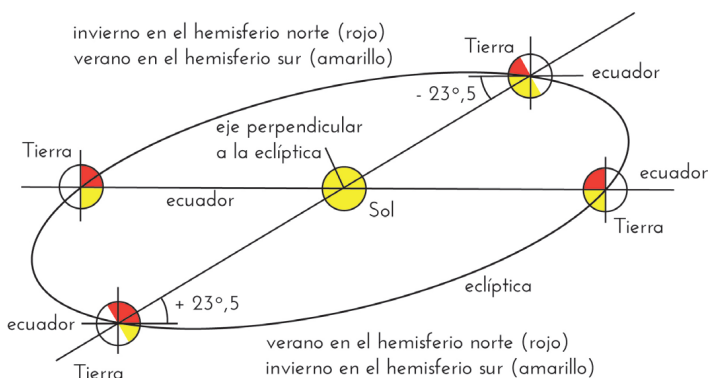


Fig. 1: Esquema del movimiento de traslación. El ángulo entre el plano del ecuador terrestre y el plano de la eclíptica es de $23,5^\circ$ así como el ángulo entre el eje de rotación terrestre y el eje perpendicular al plano de la eclíptica es también de $23,5^\circ$.

La Tierra precisa de un año para dar la vuelta completa al Sol, pero lo hace sobre un plano, el llamado plano de la eclíptica, que no es perpendicular al eje de rotación terrestre, sino que está inclinado. Concretamente el ángulo entre el eje de rotación terrestre y el eje perpendicular a la eclíptica es de $23,5^\circ$, o lo que es lo mismo el ángulo entre el plano del ecuador terrestre y el plano de la eclíptica es de $23,5^\circ$ (figura 1). Esta inclinación es la que da lugar a las estaciones. Para poder visualizar este fenómeno construiremos un pequeño modelo (figura 2).

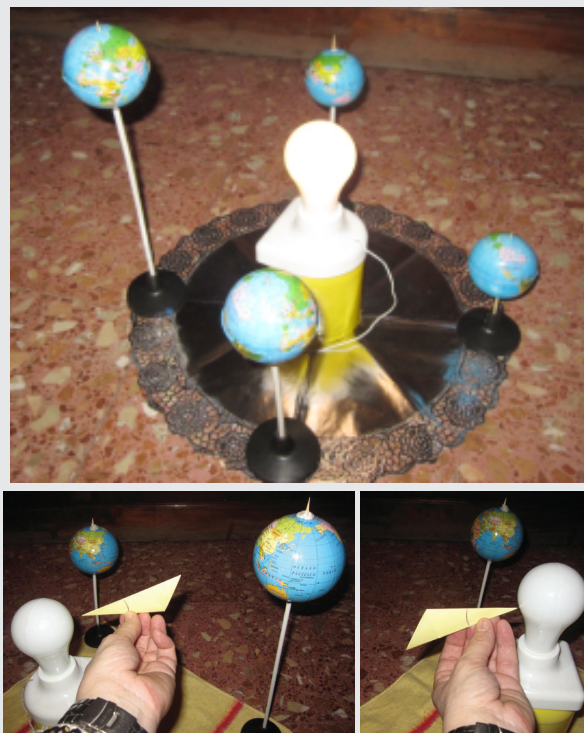


Fig. 2a, 2b y 2c: Disposición de las 4 esferas de la Tierra con la bombilla del Sol en medio. Hay que distribuir las posiciones relativas de forma que el ángulo de la línea desde el centro del Sol al centro de la Tierra forme unos 23° con el suelo, que representa el plano del ecuador.

Basta disponer de 4 esferas (donde es bueno dibujar la superficie terrestre distinguiéndose el ecuador y los dos polos) y una bombilla que servirá de Sol y situaremos en el centro. A continuación, se dan unos valores de distancias relativos al tamaño de las esferas que sirven de modelo para la Tierra, en nuestro caso de 8 cm de diámetro. Dispondremos pues de un pequeño mantel de papel o tela cuadrado de unos 25 cm de diagonal.

Situamos las 4 esferas en forma de cruz, cada una en frente de la otra (figura 2) sobre unos palitos de alturas 3, 15, 25 y 15 cm respectivamente. Los valores mencionados están calculados para que la inclinación de Ecuador respecto del plano de la eclíptica sea de aproximadamente de unos 23° .

Situaremos el modelo en una habitación a oscuras y con la bombilla del Sol (también puede ser una vela siempre y cuando la altura de la misma sea equivalente) encendida. Es evidente que la Tierra que ocupa la posición A recibe más luz en el hemisferio norte que la que está en el lugar C (figura 3). Mientras que la zona iluminada del hemisferio sur es mayor en la C que en la A. En las posiciones B y D ambos hemisferios están igualmente iluminados, estos corresponden a los equinoccios de primavera y otoño. Como cuando hay más zona iluminada decimos que es verano y cuando hay menos es invierno, se deduce que cuando la Tierra está en la posición A es verano en el hemisferio norte e invierno en el hemisferio sur. Así mismo cuando la Tierra



Fig. 3: Modelo del movimiento de translación que explica las estaciones. Cuando la Tierra está en la posición A es verano en el hemisferio norte e invierno en el hemisferio sur. Cuando la Tierra está en la posición C es invierno en el hemisferio norte y verano en el hemisferio sur. Mientras que cuando la Tierra está en las posiciones B y D están igualmente iluminados y tiene lugar los equinoccios. Los días tienen el día y la noche iguales.

está en la posición C, es invierno en el hemisferio norte y verano en el hemisferio sur.

Este modelo, puede dar mucho juego ya que si imaginamos que una persona vive en uno de los hemisferios, veremos que visualiza el Sol a diferente altura según la época del año. Imaginemos, para

figurar ideas, que tenemos una persona en el hemisferio norte cuando estamos en la posición A, esta persona ve el Sol por encima del plano del ecuador $23,5^\circ$ (figura 4a) en cambio si está en el hemisferio norte, pero en la posición C ve el Sol por debajo del ecuador $-23,5^\circ$ (figura 4b). Cuando está en las posiciones B y D lo ve exactamente sobre el ecuador, esto es a 0° sobre el ecuador.



Fig. 4a. En la posición A es verano en el hemisferio norte y el Sol está $23,5^\circ$ por encima del ecuador. En cambio en el hemisferio sur es invierno.



Fig. 4b. En la posición C es invierno en el hemisferio norte y el Sol está $23,5^\circ$ por debajo del ecuador. En cambio en el hemisferio sur es verano.

La Tierra paralela

La posición que disfrutamos en el modelo anterior “la Tierra vista desde fuera” no es sencilla de observar desde nuestra ciudad. De hecho parece totalmente imposible ya que estamos pegados a la Tierra y solo un astronauta desde su nave podría ver la Tierra desde fuera. Pero existe una simple estrategia que permite ver la Tierra desde fuera y la parte iluminada que le corresponde cada día y a cada hora. Vamos a usar para ello una Tierra paralela. Es decir, un globo terrestre iluminado de la misma forma que la Tierra por el mismo foco que es el Sol.



Fig. 5: Un foco ilumina dos esferas de la misma forma y produce las mismas zonas de luz y sombra

Si un foco ilumina dos esferas produce sobre ellas las mismas zonas de luz y sombra (figura 5), así si orientamos correctamente el globo terrestre estará la misma zona en el globo que lo está nuestro planeta y podremos verlo como si fuéramos un astronauta situado más lejos de lo que esta la ISS.

Usaremos pues un globo terrestre de los usuales, solo que le quitaremos el pie y lo situaremos sobre un vaso, con el eje de rotación del globo terrestre en la misma dirección que lo tiene realmente la Tierra (podemos ayudarnos de una brújula que nos indicara a dirección norte-sur). Además sabemos que la posición de nuestra ciudad debe estar en la parte superior del globo, ya que, cualquier lugar del mundo donde vivamos, si nos movemos en línea recta en cualquier dirección durante muchos km tiempo, está claro que siempre acabaremos por descender sobre la superficie del globo. Así pues nuestra posición es siempre la superior.

En consecuencia, usaremos una brújula que nos indique la dirección norte-sur para orientar el eje del globo y situaremos nuestra ciudad arriba del todo (figura 6a). Para comprobar que está bien colocada podemos dejar un lápiz sobre la ciudad en equilibrio, si está arriba no se caerá, si se cae el lápiz hay que corregir un poco la posición hasta que quede estable. Podemos ilustrar esta posición colocando un muñequito que nos represente (figura 6b).

Con pedacitos de “pastelinas” podemos marcar la línea sol/sombra y veremos que lentamente se ira desplazando por la superficie del globo a medida que pasan las horas y llegar a un momento en que será de noche. Podemos poner pequeños trozos de palillos a modo de gnomon y ver como son las sombras y como se desplazan a lo largo del día y visualizar os efectos del movimiento de rotación sobre la Tierra (figura 6b).

Pero lo más interesante es visualizar el movimiento de traslación, esto es ver cómo se sitúa la línea sol/sombra a lo largo del año. Así se puede observar que en verano (figura 7a), invierno (figura 7b) y en los equinoccios (figura 7c) tal como se podía comprobar en el modelo inicial con las cuatro esfera terrestres (figura 3).

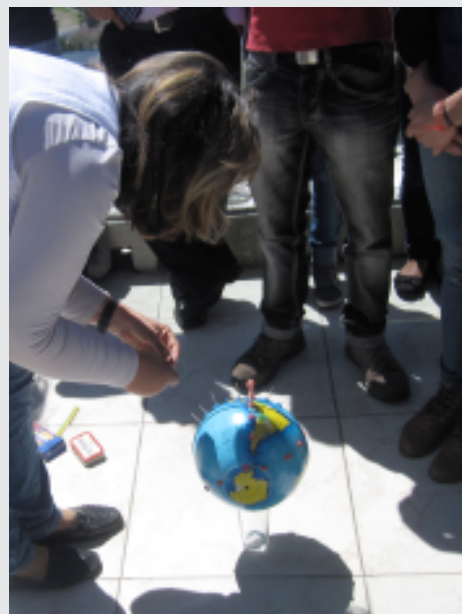


Fig. 6a: El globo terrestre, con el soporte usual, no sirve de modelo. El globo terrestre debe situarse en el exterior, sobre un vaso y bien orientado, con el lugar desde donde nosotros observamos en la parte superior para ser un modelo perfecto.

Fig.6b: Podemos situar un muñeco indicando nuestra posición y trocitos de pastelina para indicar la línea de la zona luz/sombra. Con el paso de las horas esta línea luz/sombra se ira corriendo. También se pueden situar algunos trozos de palillos para estudiar sus sombras.

Pero después de considerar estos dos modelos creemos que es necesario introducir el modelo más “real” para el observador que está ligado a la Tierra y que cada día observa los astros moverse respecto de su horizonte. Construiremos un modelo relativo al horizonte local del observador, UN MODELO REALMENTE OBSERVACIONAL.



Fig. 7a: En el hemisferio norte, el polo norte esta en la zona soleada por lo tanto significa que es verano para este hemisferio y estamos observando el fenomeno del sol de medianoche. En el hemisferio sur, el polo sur esta en la sombra y es invierno .Fig. 7b: La zona del polo norte está dentro de la zona de la noche, por lo tanto en el hemisferio norte es invierno. En el hemisferio sur, el polo sur esta iluminado y por lo tanto es verano para ellos. Fig 7c: La línea de separación del día y la noche pasa por ambos polos, esto es, el primer día de primavera o el primer día de otoño.

La Observación del horizonte

Los profesores de muchas ramas de la ciencia (mecánica, electricidad, química, biología, etc.) pueden decir que no es posible trabajar de forma correcta en un centro de secundaria si no se dispone de un laboratorio. En este sentido, los profesores de astronomía están contentos porque ellos siempre disponen de un "laboratorio de astronomía". Todos los institutos y escuelas tiene un sitio para los juegos de sus alumnos: el patio. El patio no es solo un punto de recreo, es también un laboratorio de astronomía: es un lugar que ofrece la posibilidad de llevar a cabo en él actividades prácticas de astronomía. Puesto que si en toda escuela o instituto se dispone de un laboratorio, ¡parece oportuno usarlo!



Fig. 8: Representación clásica de la esfera celeste.

Un problema que surge cuando el estudiante se acerca al patio para desarrollar desde él actividades prácticas de astronomía, es la diferente situación relativa de la esfera celeste cuando el profesor explica dentro del recinto de una clase y cuando explica fuera de ella, en el patio del colegio.

Cuando el profesor, sobre la pizarra, textos o maquetas, habla de meridianos y paralelos, de coordenadas de posición, presenta figuras parecidas a la figura 5. Lo que no representa

mayor dificultad y los estudiantes pueden entender sin problemas. Las figuras que tienen los alumnos ante sus ojos son análogas a las que han usado cuando estudiaban geografía (figura 9).

Los problemas comienzan cuando estamos observando y no aparece ninguna línea en el cielo. No se puede ver el eje de rotación y no es sencillo encontrar referencias en el firmamento. El principal escollo es que ahora el estudiante está situado en el interior de la esfera celeste mientras que hemos presentado toda la información en la clase mirando el cielo desde el exterior de la esfera celeste. Entonces no resulta fácil comprender la nueva situación vista desde dentro (figura 10).

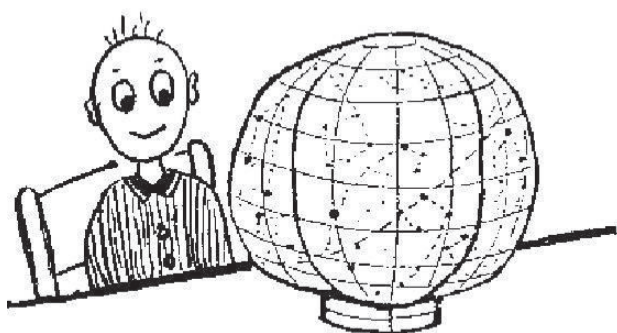


Fig. 9: La esfera celeste desde el exterior

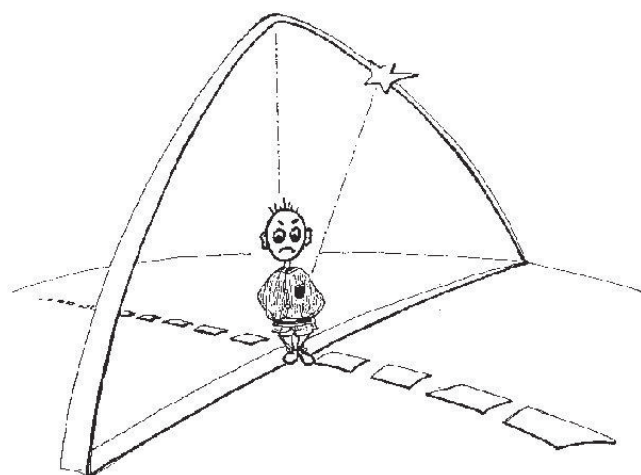


Fig. 10: La esfera celeste desde el interior

Obviamente después de esta experiencia podríamos pensar en un cambio de nuestra presentación en el aula. Es posible hacer en el aula de clase una presentación desde el punto de vista del interior de la esfera. Esta forma de ver las cosas es más similar a la situación real del observador, pero no es bueno sólo ofrecer esta presentación. Los estudiantes deben ser capaces de poder leer cualquier libro de astronomía y poder entender la abstracción correspondiente a la observación de la esfera celeste des-

de el exterior, situación normal en la literatura científica. En estas circunstancias, es posible pensar en construir un modelo para los estudiantes de secundaria que haga viable comparar ambos puntos de vista y que también permita "hacer visibles" las líneas del cielo y una mejor comprensión del propio horizonte.

Modelo local del horizonte

Se empieza fotografiando el horizonte. Con una cámara sobre un trípode, es muy sencillo tomar un conjunto de fotografías del horizonte desde algún lugar del patio del colegio -si las edificaciones colindantes lo permiten- o desde una terraza con el horizonte más despejado. (Señalaremos la posición del trípode marcándola sobre el suelo con pintura, para poder disponerlo de nuevo de forma exactamente igual).



Fig. 11: El horizonte local

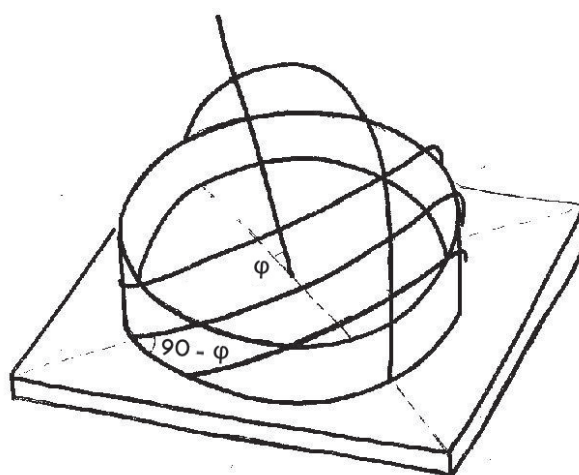


Fig. 12: Modelo mostrando la latitud y la colatitud

Es muy importante seleccionar muy bien el lugar porque la idea es situar allí el modelo durante cada observación. Al tomar cada fotografía es necesario que el encuadre tenga una zona común en la siguiente fotografía, para disponer después

las copias sobre papel una sobre la otra y obtener el horizonte como una cadena de fotografías con continuidad.



Fig. 13: Con el eje del mundo



Fig. 14: Con el meridiano del lugar

Cuando tengamos las fotografías reveladas podemos fijar las copias una a continuación de la otra, formando un cilindro que después asentaremos sobre una base cuadrada de madera en el mismo lugar donde se han realizado las fotografías (figura 11). Es muy importante situar todas las fotografías acordes con el horizonte real.

A continuación se introduce el eje de rotación terrestre. Dando el valor de la latitud del lugar ϕ se puede introducir en la maqueta un alambre según esta inclinación (figura 12).

Con este dato es posible fijar el eje de rotación del modelo. Pero como el modelo está orientado según el horizonte local, la prolongación del alambre sirve para ayudar a visualizar el eje real y localizar el Polo Sur, y es útil también para imaginar la posición del punto cardinal Sur (figura 13).

Obviamente introducir el punto cardinal Norte y el Polo Norte resulta fácil. A continuación se puede trazar la recta Norte-Sur sobre el modelo y también sobre el suelo del patio o la terraza donde se trabaja (usando el proceso normal de determinación

de la recta Norte-Sur). Es muy importante porque cada vez que se vaya a usar el modelo habrá que orientarlo y es muy útil disponer de esta recta Norte-Sur real para facilitar el trabajo. (Con una brújula se puede comprobar dicha dirección).

El siguiente objetivo consiste en situar el meridiano del lugar. El meridiano local es muy fácil de definir, pero no resulta un concepto simple de asimilar para los estudiantes (quizá, en parte, porque cada uno tiene su meridiano del lugar). Se puede fijar un alambre que pase por los puntos cardinales Norte y Sur y el eje de rotación de la Tierra (figura 14). Este alambre es la visualización del meridiano del lugar en el modelo, pero permite imaginar sobre el cielo la línea del meridiano local. Ahora es muy fácil de imaginar porque empieza en los mismos lugares que el estudiante puede ver en el modelo. El meridiano local empieza en el mismo edificio que en la fotografía, pero en el horizonte real, y después de pasar por encima de su cabeza acabará en el mismo edificio que se visualiza gracias al alambre en el horizonte de fotografías.

Para introducir el ecuador el proceso es algo más complicado. Una posibilidad consiste en trazar la línea Este-Oeste. Esta solución es muy sencilla, pero no aporta nada desde el punto de vista pedagógico. Para su aplicación a la enseñanza puede ser más conveniente usar de nuevo la fotografía. Se puede situar de nuevo la cámara sobre el trípode exactamente en la misma posición en que se tomaron las fotografías del horizonte en la primera ocasión en que se comenzó a desarrollar la maqueta (por este motivo se pinta en el suelo las marcas correspondientes para poder situar el trípode de nuevo en el mismo lugar). Con la cámara sobre el trípode se toma una foto de la salida y la puesta de Sol el primer día de primavera o de otoño. En este caso, tendremos dos instantáneas de la posición precisa de los puntos cardinales Este y Oeste respectivamente, respecto al horizonte de las fotografías y obviamente sobre el horizonte real.

El ecuador se simula por medio de un alambre perpendicular al eje de rotación terrestre que empieza y acaba en los puntos cardinales Este y Oeste (sobre el horizonte, en la recta perpendicular a la Norte-Sur). Pero no es sencillo fijar el círculo de alambre perpendicular al alambre que simboliza el eje de rotación, porque el eje de rotación está inclinado y obviamente el ecuador también deberá estarlo, pero ¿con qué inclinación hay que situarlo? Tomaremos cuatro o cinco fotografías de la salida del

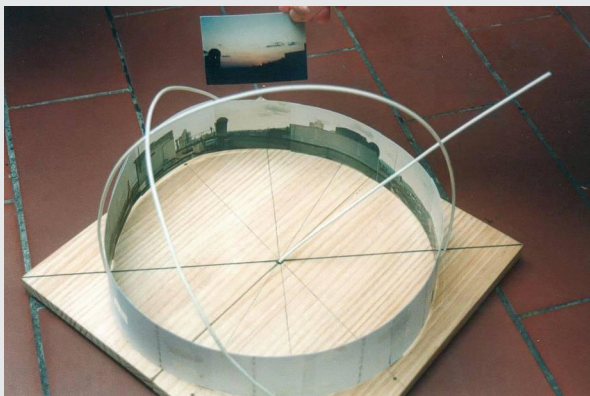


Fig. 15: Punto de puesta del Sol el día de equinoccio de primavera o de otoño

Sol le primer día de primavera u otoño. Es peligroso fotografiar el Sol cuando este está bastante elevado, hay que hacerlo sólo cuando sea posible mirar la salida del Sol sin que nos moleste la vista. En cuanto moleste un poco hay que dejar de observar y de fotografiar, puede resultar peligroso. Tomaremos todas las fotografías realizadas con el mismo encuadre y usando un software apropiado las sobre ponemos unas con otras (tomaremos alguna referencia del horizonte) y podremos distinguir la inclinación del mismo Sol sobre el horizonte. Esta fotografía nos servirá para introducir la inclinación apropiada en el alambre que representa el ecuador en el modelo (figura 18).



Fig. 16: Taza de la salida del Sol

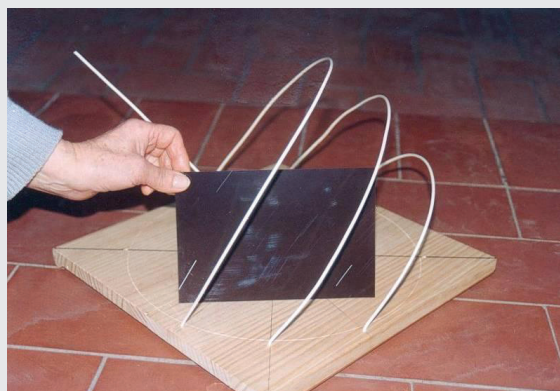


Fig. 17: Trazas de las estrellas en la zona este.

Se sabe los puntos donde fijarlo y también la inclinación, así es que puede sujetarse el alambre sobre la madera y también sujetarlo con el meridiano local (figura 16).

Si se considera el Sol como una estrella más (el Sol es el más importante para los observadores porque está más próximo, pero su comportamiento no es diferente al de las otras estrellas) puede obtenerse la inclinación del movimiento de las estrellas cuando éstas se elevan o se ponen respecto al horizonte. Para ello, basta con que se capten dos fotografías de este instante próximas al punto cardinal Este y al punto cardinal Oeste (figura 17).

No es posible tomar las fotografías mencionadas en el párrafo anterior desde la ciudad donde esta construida la escuela. Es preciso salir al campo, a un lugar suficientemente apartado sin contaminación luminosa. Hay que captar las fotografías con una cámara réflex, sobre un trípode y con un disparador de cable. Unos 10 minutos de tiempo de exposición son suficientes. Es muy importante situar la cámara paralela al horizonte (se puede utilizar un nivel para realizar esta operación).

Es importante aprovechar esta ocasión para obtener un pequeño repertorio de fotografías. Por ejemplo se puede tomar una de la zona del polo dando unos 15 minutos de exposición, otra de la zona por encima de ella siguiendo el meridiano local, otra a continuación siguiendo también el mismo meridiano y así sucesivamente hasta conseguir la fotografía que ya esta rasante al horizonte. La idea es fotografiar todo el meridiano local desde el Norte hasta el Sur pasando por encima de nuestras cabezas. Evidentemente el meridiano local del lugar donde ha decidido tomar las fotografías no es el mismo que el de la escuela, pero los alumnos pueden comprender esta pequeña diferencia fácilmente.

Cuando se tienen todas las fotografías podemos construir una cinta del meridiano con todas ellas. Con esta cinta los estudiantes pueden comprender mejor el movimiento de la esfera celeste alrededor del eje de rotación de la Tierra. Es interesante ver que con el mismo tiempo de exposición la trayectoria dibujada por una estrella cambia de longitud. Es mínima en el entorno al polo y es máxima en el ecuador. También cambia de forma. En el ecuador la trayectoria dibuja una línea recta. En la zona próxima a la polar las líneas son curvas cóncavas y por debajo del ecuador son

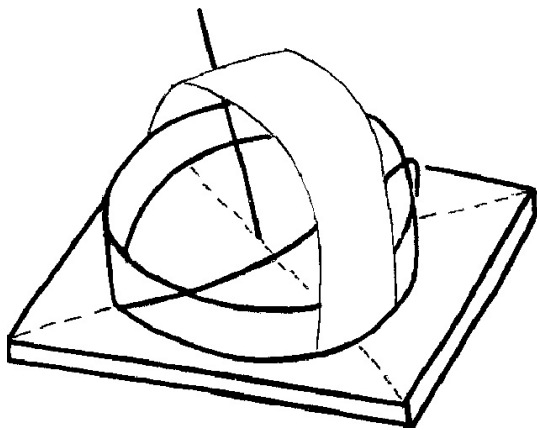


Fig. 18: El meridiano local con fotografías

son convexas. Si hacemos las copias sobre papel de las fotografías suficientemente grandes, podemos situar la cinta por encima de la cabeza del estudiante, lo que le permitirá visualizar y comprender mejor el movimiento.

Usando las dos fotografías de los puntos cardinales Este y Oeste, es posible conocer la inclinación de las trazas de las estrellas en el ecuador, y por lo tanto es posible situar el alambre que simboliza el ecuador sin problemas. Se sabe los puntos donde fijarlo y también la inclinación, así es que puede sujetarse el alambre sobre la madera y también sujetarlo con el meridiano local (figura 15).

Evidentemente es posible introducir la cinta de fotografías del meridiano local sobre el modelo. Es suficiente hacer algunas fotocopias y agujerearlas

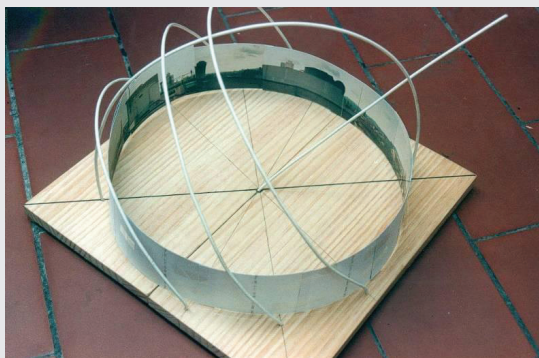


Fig. 19: Trayectorias del Sol el primer día de cada estación. Los puntos de salida y puesto no coinciden salvo dos días: el día de los equinoccios.

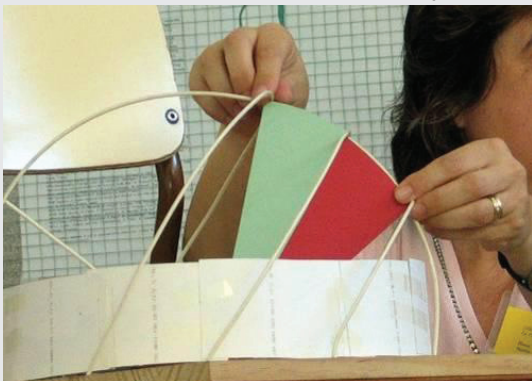


Fig. 20: El ángulo entre dos trayectorias del primer día de dos estaciones consecutivas es de 23.5°

por el punto que indica la polar para poder introducir el eje de rotación. Se observa que el alambre del ecuador se corresponde con las trazas en línea recta que se tienen en la cinta (figura 18).

Con el modelo se puede ofrecer al estudiante las dos posibilidades de visualizar la esfera celeste desde el interior y desde el exterior.

Si se toma de nuevo dos fotografías del primer día del invierno y del verano cuando el Sol sale y se pone, los alumnos podrán ver que las situaciones extremas en su ciudad son muy diferentes. Es sorprendente la diferencia que hay entre una y otra. También puede fijarse los paralelos de Cáncer y de Capricornio con las fotografías que proporciona la inclinación del ecuador, dado que los paralelos siguen esta misma inclinación. Con un simple transportador es posible verificar que el ángulo interior entre el paralelo de Cáncer y el ecuador es aproximadamente 23° , y que este ángulo es también el formado entre el ecuador y el paralelo de Capricornio (figuras 19 y 20).

Para la formación de los estudiantes es interesante que ellos puedan observar que el Sol no sale y se pone en la misma posición y que ésta no siempre coincide con el Este y el Oeste respectivamente. Hay muchos libros que mencionan que el Sol sale por el Este y se pone por el Oeste. Los estudiantes pueden ver que esto sólo es cierto dos veces al año, pero no lo es los días restantes (figuras 19 y 20).

De esta forma los alumnos ven de forma práctica y simultánea, la esfera desde el interior (la esfera real) y desde el exterior (el modelo). Con la ayuda de la maqueta los estudiantes pueden entender mejor su entorno, y las actividades de orientación realizadas desde la escuela se resuelven de forma muy sencilla. También pueden visualizar la zona que corresponde al movimiento del Sol, entre los paralelos de la maqueta e imaginarla sobre el cielo y el horizonte real de la ciudad. La orientación se convierte en un juego de niños.

Relojes de Sol

Pero hay otras posibilidades de aplicación del modelo. La maqueta no es más que un reloj de Sol, un gran reloj de Sol. Es fantástico para explicar de una forma sencilla y didáctica la construcción de un reloj considerando sólo el horizonte y el movimiento del Sol. En primer lugar es muy fácil ver que el eje de rotación de la Tierra

se convierte en el estilete del reloj.

Si introducimos un plano en la dirección del plano ecuatorial y movemos una linterna sobre el paralelo de Cáncer, se puede ver la sombra del estilete (el alambre que representa el eje de rotación terrestre) recorriendo el plano del cuadrante ecuatorial, pero cuando se transita con la linterna sobre el paralelo de Capricornio entonces la sombra aparece en la zona de debajo del plano, y es evidente que cuando la linterna se sitúa sobre el ecuador no se obtiene sombra. Así pues resulta sencillo comprobar que el reloj ecuatorial funciona en verano y primavera mostrando las horas sobre el plano del reloj, en invierno y

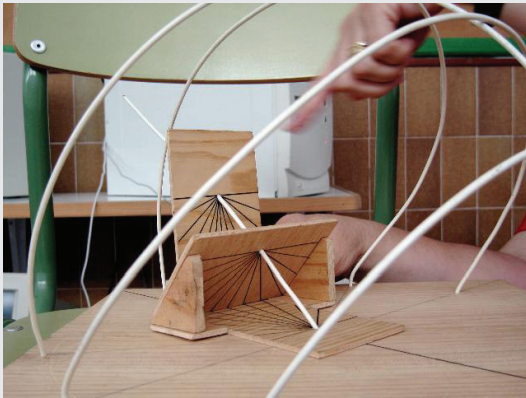


Fig. 21: El modelo es un enorme reloj de Sol. Se pueden considerar de tres tipos.

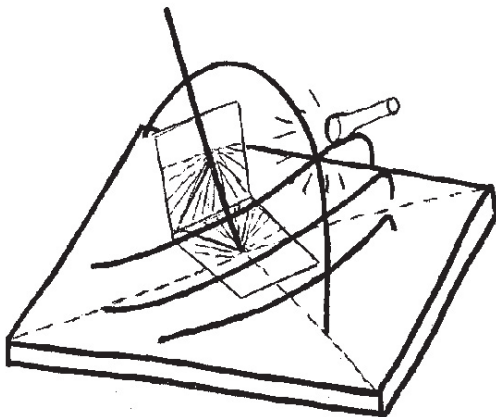


Fig. 22: Los relojes y las estaciones

otoño debajo del mismo, y que hay dos días al año en que no funciona: los días de ambos equinoccios.

Si se considera el plano ecuatorial, el horizontal y el vertical orientado (Este-Oeste), se puede ver que la linterna señala la misma hora en los tres cuadrantes (figura 21). Además, puede observarse cuando son las horas de la mañana y de la tarde para el mismo estilete (el eje de rotación terrestre). Obviamente es la misma hora en los tres relojes. Se comprueba fácilmente en que zona hay que dibujar las horas de la mañana y de la tarde en cada reloj. (Todos los profesores han recibido alguna vez las horas mal dibujadas en un reloj

solar; usando este modelo esto ya no sucede).

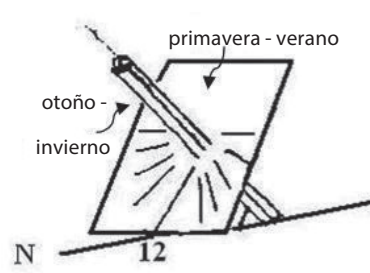


Fig. 23: Reloj ecuatorial en estación (hemisferio norte).

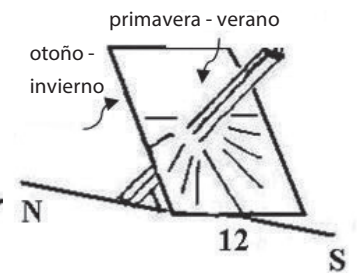


Fig. 24: Reloj ecuatorial en estación (hemisferio sur).

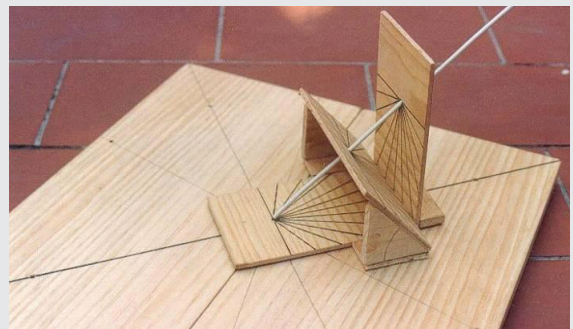
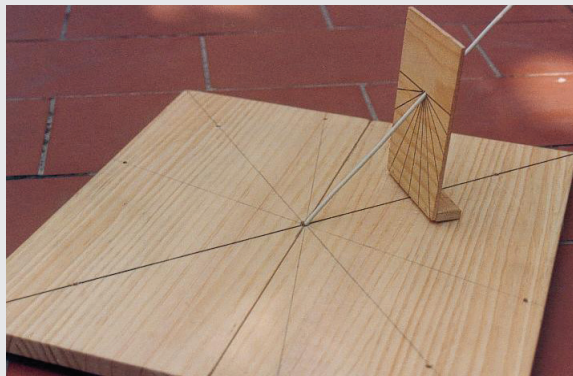
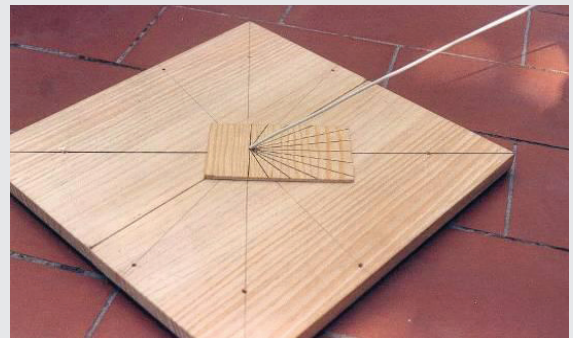
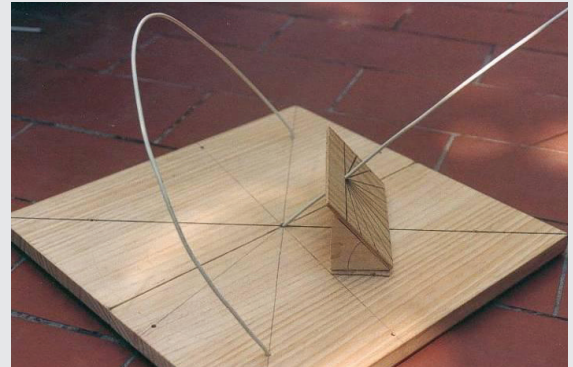


Fig. 26a, 26b, 26c y 26d: Diversas instantáneas de los tres relojes.

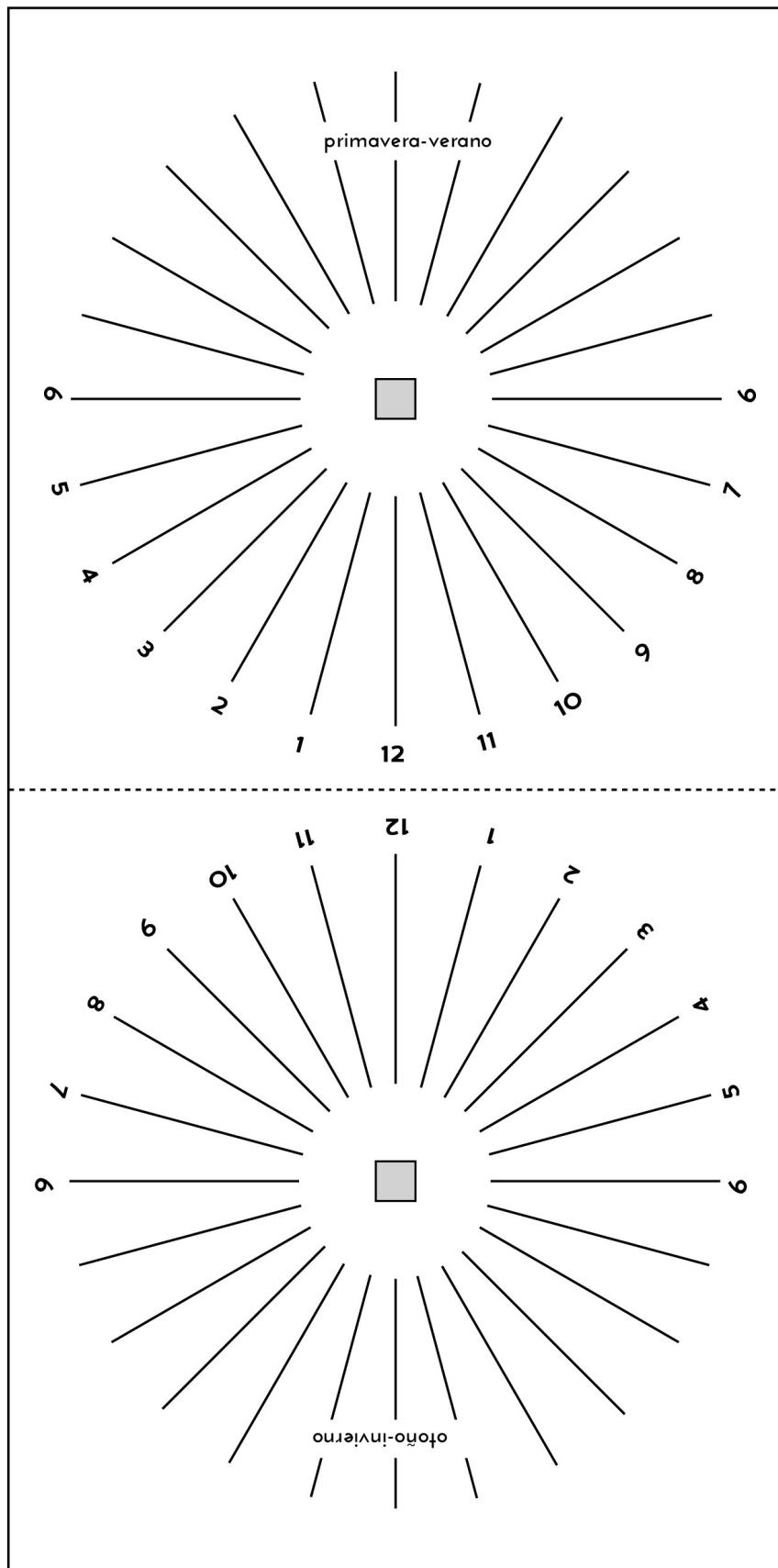
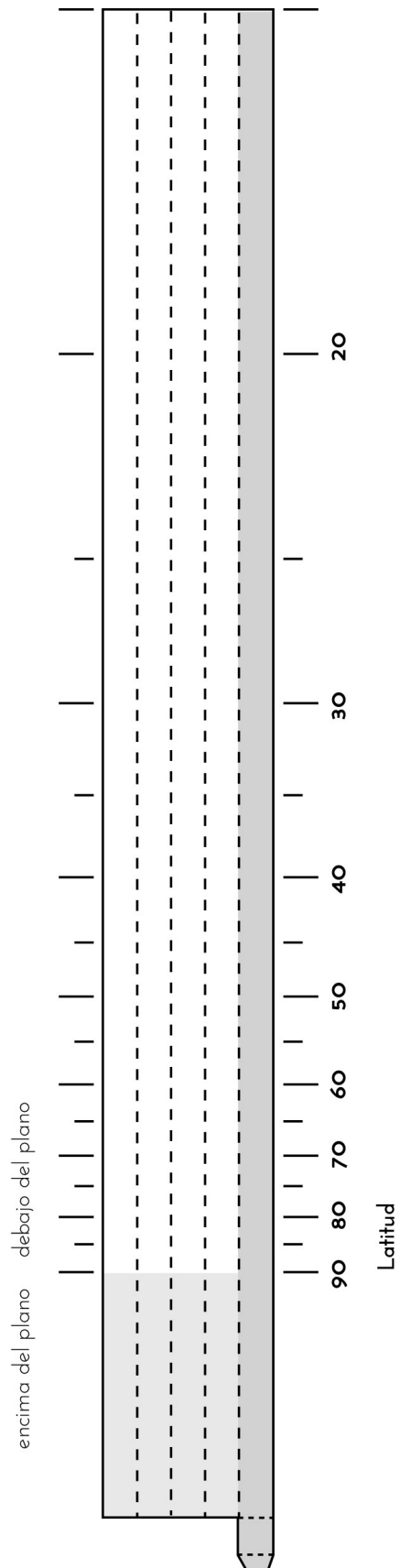


Fig. 25: Recortable del reloj ecuatorial



Al mover la linterna sobre los paralelos de Capricornio y Cáncer se ve fácilmente que el rayo de luz emitido por la lámpara produce sobre el plano una cónica diferente. En el primer caso (el primer día de verano) la cónica es casi una circunferencia y el área encerrada es claramente más pequeña que en el segundo caso. Cuando se sigue el otro paralelo (primer día de invierno) la sección es elíptica y el área encerrada es mucho mayor. Entonces los alumnos pueden comprender que la radiación está más concentrada en la primera situación, es decir, que la temperatura superficial es mayor en verano, y como que también es evidente en el modelo que el número de horas de insolación solar es mayor, la consecuencia natural es que en verano hace más calor que en invierno (figura 22).

Aprovecharemos esta oportunidad para mencionar algunos elementos que hay que conocer para poder construir un reloj de Sol.

El reloj ecuatorial es muy sencillo de realizar. Basta situar el estilete en la dirección del eje de rotación terrestre, esto es en la dirección Norte-Sur (una brújula nos puede ayudar a hacerlo) y con una altura sobre el plano del horizonte igual a la latitud del lugar (figuras 23 y 24). El estilete de cualquier reloj se situara siempre de la misma manera.

Las líneas horarias del reloj ecuatorial se dibujaran a 15 grados (figura 25), ya que el Sol da una vuelta de 360° en 24 horas. Si dividimos $360/24 = 15^\circ$ cada hora.

Las líneas horarias de un reloj horizontal o vertical orientado se obtienen por proyección del ecuatorial, sin más que considerar la latitud del lugar (figuras 26a, 26b, 26c y 26d)

Resumiendo:

Tiempo Solar + Ajuste Total = Tiempo del reloj de pulsera

días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec
1	+3.4	+13.6	+12.5	+4.1	-2.9	-2.4	+3.6	+6.3	+0.2	-10.1	-16.4	-11.2
6	+5.7	+5.1	+11.2	+2.6	-3.4	-1.6	+4.5	+5.9	-1.5	-11.7	-16.4	-9.2
11	+7.8	+7.3	+10.2	+1.2	-3.7	-0.6	+5.3	+5.2	-3.2	-13.1	-16.0	-7.0
16	+9.7	+9.2	+8.9	-0.1	-3.8	+0.4	+5.9	+4.3	-4.9	-14.3	-15.3	-4.6
21	+11.2	+13.8	+7.4	-1.2	-3.6	+1.5	+6.3	+3.2	-6.7	-15.3	-14.3	-2.2
26	+12.5	+13.1	+5.9	-2.2	-3.2	+2.6	+6.4	+1.9	-8.5	-15.9	-12.9	+0.3
31	+13.4		+4.4		-2.5		+6.3	+0.5		-16.3		+2.8

Tabla 1: Ecuación de Tiempo

Tiempo solar y tiempo del reloj de “pulsera”

Los relojes de Sol dan el tiempo solar, que no es el mismo que figura en los relojes que todos usamos en nuestra muñeca. Hay que considerar varios ajustes.

Ajuste de Longitud

El mundo se divide en 24 zonas de tiempo a partir del primer meridiano o meridiano de Greenwich. Para hacer el ajuste de longitud hay que conocer la longitud local y la longitud del meridiano “Standard” de su zona. Se añade con signo + hacia el Este y con signo – hacia el Oeste. Hay que expresar las longitudes en horas minutos y segundos (1 grado = 4 minutos de tiempo).

Ajuste de verano/invierno.

Casi todos los países tienen el tiempo de verano y el de invierno. Se suele añadir una hora en verano. El cambio de horario de verano/invierno es una decisión del gobierno del país.

Ajuste de la Ecuación de Tiempo

La Tierra gira entorno al Sol según la ley de las áreas, es decir, no es un movimiento constante, lo cual significa un serio problema para los relojes mecánicos. Así pues, se define el tiempo medio (de los relojes mecánicos) como el promedio a lo largo de un año completo del tiempo. La Ecuación de Tiempo es la diferencia entre el «Tiempo Solar Real» y el «Tiempo Medio». Esta ecuación aparece tabulada en la tabla 1.

Ponemos a continuación un par de ejemplos de dos ugares bien distantes: Barcelona en España y Tulsa en los Estados Unidos.

Ejemplo 1: Barcelona (España) el 24 de Mayo.

Ajuste	Comentario	Resultado
1. Longitud	Barcelona esta en la misma zona “estándar” que Greenwich. Su longitud es $2^{\circ}10'E = 2.17^{\circ} E = -8.7m$ (1° es equivalente a 4 m)	-8.7 m
2. Horario de verano	Mayo tiene horario de verano +1h	+ 60 m
3. Ecuación de Tiempo	Leemos la tabla para el 24 de Mayo	-3.6 m
Total		+47.7 m

Por ejemplo a las 12h de tiempo solar, nuestros relojes de “pulsera” señalan

(Tiempo solar) $12h + 47.7 m = 12h 47.7 m$ (Tiempo del reloj de pulsera)

Ejemplo 2: Tulsa Oklahoma (Estados Unidos) 16 de Noviembre.

Ajuste	Comentario	Resultado
1. Longitud	El meridiano “estándar” de Tulsa esta a $90^{\circ} W$. Su longitud es $95^{\circ}58'W = 96^{\circ} W$, entonces esta a $6^{\circ} W$ desde el meridiano “estándar” (1° es equivalente a 4 m)	+24 m
2. Horario de verano	Noviembre no tiene horario de verano	
3. Ecuación de Tiempo	Leemos la tabla para el 16 de Noviembre	-15.3 m
Total		+ 8.7 m

Por ejemplo a las 12h de tiempo solar, nuestros relojes de “pulsera” señalan

(Tiempo solar) $12h + 8.7 m = 12h 8.7 m$ (Tiempo del reloj de pulsera)

La orientación

Otro problema que se puede observar en los alumnos es el vinculado a sus dificultades de orientación. En un curso de astronomía general, hay que conseguir instruirlos en el sentido de la orientación. Es posible que nuestros alumnos jamás estudien nuevamente astronomía. El mínimo resultado que hay que esperar de un curso (único) de astronomía consiste en que los alumnos sean capaces de reconocer dónde está el Norte, saber que la trayectoria del Sol está sobre el horizonte sur y que los planetas se mueven sobre este horizonte, y en particular que puedan ubicar los diferentes accidentes geográficos de su ciudad. Por ejemplo, sobre el horizonte de Barcelona (figuras 27a y 27b) los estudiantes pueden considerar diversas posibilidades relativas a la posición del Sol, la Luna y ciertas constelaciones sobre el horizonte. Las dos montañas que nosotros vemos están aproximadamente en posición opuesta. Pero para los estudiantes esto no significa nada y normalmente les cuesta distinguir que ciertos dibujos son posibles mientras que otros no se pueden dar jamás. Ellos conocen la teoría, pero la práctica no es suficiente si ellos no entienden las diferentes posibilidades.

La utilización del modelo pensado para resolver los inconvenientes mencionados en el apartado anterior resultó muy eficiente para aclarar muchas cuestiones relativas a la orientación en el horizonte local de una forma que inicialmente no estaba prevista.

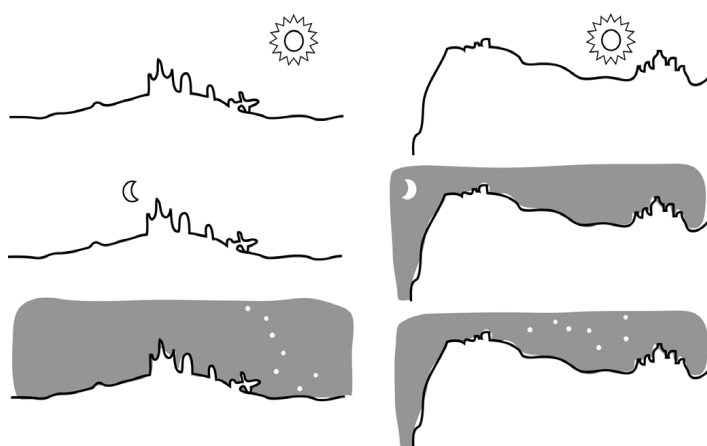


Fig. 27a: Horizonte Noroeste de Barcelona.

Fig. 27b: Horizonte Sudoeste de Barcelona.

Es bueno mencionar que este modelo es útil para explicar la situación local de la esfera celeste durante el día y durante la noche. Realmente sirve para comprender mejor el movimiento del Sol (y de otros miembros del Sistema Solar que se mueven en la zona próxima). Usando el modelo

propuesto, los alumnos entienden que un astro brillante en la zona de la Polar o de la Cruz de Sur nunca puede ser un planeta.



Fig. 28a: El modelo realizado con alumnos de primaria.

Es una buena inversión producir un modelo como el explicado a gran escala. En ese caso los alumnos, e incluso los adultos pueden meterse dentro y verificar la posición del Sol en comparación con ecuador y los paralelos que corresponden al primer verano e invierno (figura 28a). En algunos museos de la ciencia ya se han construido este tipo de modelo (figura 28b).



Fig. 28b: El modelo a gran escala en el Parque de las Ciencias de Granada.

Después de usar el modelo los alumnos pueden discernir contenidos que antes no se les habrían ocurrido. Les queda, por ejemplo, muy claro que el Sol no sale y se pone perpendicularmente al horizonte salvo en el ecuador.

Bibliografía

- Alemany, C., Ros, R.M., *Parallel Earth*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, EU-UNAWA, Barcelona, 2012
- Lanciano, N., *Strumenti per i giardino del cielo*, Edizioni junior, Spaggiari Eds, Roma, 2016
- Ros, R.M., "De l'intérieur et de l'extérieur", *Les Cahiers Clairaut*, 95, p.1-5, Orsay, 2001.
- Ros, R.M., "Laboratorio de Astronomía", *Tribuna de Astronomía*, 154, p.18-29, 1998.
- Ros, R.M., "Sunrise and sunset positions change every day", *Proceedings of 6th EAAE International Summer School*, 177, 188, Barcelona, 2002.
- Ros, R.M., Capell, A., Colom, J., *El planisferio y 40 actividades más*, Antares, Barcelona, 2005.
- Ros, R.M., Lanciano, N., "El horizonte en la Astronomía", *Astronomía Astrofotografía y Astronáutica*, 76, p.12-20, 1995.

Simuladores del movimiento de las estrellas, el Sol y la Luna

Rosa M. Ros, Francis Berthomieu

International Astronomical Union, Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España), CLEA (Niza, Francia)

Resumen

Se presenta un método sencillo para explicar cómo se observa el movimiento de las estrellas, el Sol y la Luna en diferentes lugares de la superficie terrestre. El procedimiento consiste en construir un sencillo modelo que permite simular estos movimientos a la vez que modificar los diferentes valores de la latitud del lugar.

Objetivos

- Comprender el movimiento de las estrellas para diferentes latitudes.
- Comprender el movimiento del Sol para diferentes latitudes.
- Comprender el movimiento de la Luna para diferentes latitudes.

La idea que hay detrás del simulador

No es simple explicar los movimientos del Sol, la Luna o las estrellas observados desde la Tierra. Los estudiantes saben que el Sol se levanta y se pone a diario, pero sienten una sorpresa cuando descubren que sale y se pone por diferentes puntos cada día. También es interesante considerar las distintas trayectorias solares de acuerdo con la latitud local. Y puede ser difícil intentar explicar el fenómeno del Sol de la medianoche o del paso solar por el cenit. Especialmente el simulador puede ser muy útil para entender el movimiento de la traslación y justificar las estaciones para algunas latitudes.

Si deseamos que alguien aprenda la forma y el aspecto de cada constelación podemos explicarle algunas historias mitológicas que las relacionan y algunas reglas geométricas para encontrar una constelación cerca de otra, o una estrella alineada con otra. Esta presentación no tiene dificultades especiales, pero los problemas pueden aparecer cuando consideramos el movimiento de la esfera celeste alrededor del eje de rotación terrestre. Cualquier persona puede entender muy bien que

si el observador vive en el Polo Norte pueden ver todas las estrellas del hemisferio norte y si vive en el Polo Sur le es posible ver todas las estrellas en el hemisferio sur.

Simulador estelar. ¿Por qué hay estrellas invisibles?

Pero todo se complica cuando el observador vive en alguna zona que no es alguno de los dos polos, que es la situación de la mayoría de los observadores. En este caso, las estrellas se dividen en tres categorías diferentes (para cada latitud): circumpolares, estrellas con salida y puesta y estrellas invisibles (figura 1). Todos nosotros tenemos experiencia de lo sorprendido que siente toda persona

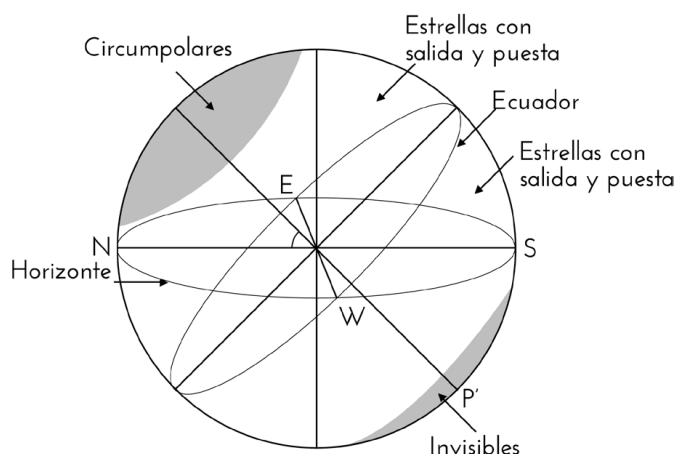


Fig. 1: Las tres diferentes categorías de estrellas (para cada latitud).

que descubre que aun viviendo en el hemisferio norte, puede observar que algunas estrellas del hemisferio sur. Por supuesto es similar a la sorpresa que se siente al descubrir el fenómeno del Sol de la medianoche.

El principal objetivo del simulador

El objetivo principal es descubrir qué constelaciones son circumpolares, cuales salen y se ponen y cuales son invisibles para una latitud específica. Por supuesto, si cambiamos la latitud del observador, algunas constelaciones que eran circumpolares

pueden convertirse en constelaciones con salida y puesta, o al contrario pueden ser invisibles. Si observamos desde un lugar de latitud próxima a los 45° N, está claro que podemos ver las estrellas del hemisferio meridional salir y ponerse cada noche (figura 1).

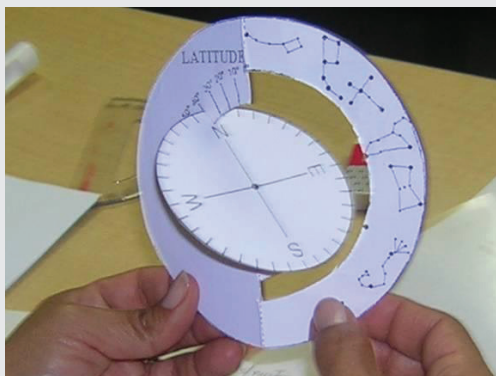


Fig. 2: Usar el manifestante. Éste es un ejemplo de simulador para el hemisferio norte según la tabla 1.

En nuestro caso, el simulador incluye algunas constelaciones que han sido repartidas según sus diferentes declinaciones (sin considerar sus ascensiones rectas porque en este caso no es nuestro objetivo). Es una buena idea utilizar las constelaciones que son bien conocidas para cualquier principiante y con diversas ascensiones rectas, para tener constelaciones visibles en diversos meses del año (figura 2).

Para seleccionar la constelación a dibujar, solamente se considerarán las estrellas más brillantes para que sea fácil reconocer la forma de cada

Constelación	Máximo declinación	Mínimo declinación
Osa Menor	+90°	+70°
Osa Mayor	+60°	+50°
Cisne	+50°	+30°
Leo	+30°	+10°
Orión y Sirius	+10°	-10°
Escorpión	-20°	-50°
La Cruz del Sur	-50°	-70°

Tabla 1: Constelaciones que aparecen en el simulador considerado.

constelación. No utilizamos las constelaciones que están en el mismo meridiano, porque decidimos elegir las más conocidas (tabla 1). (Si usted está interesado en hacer este estudio para cada estación, se pueden construir cuatro simuladores distintos, uno para cada estación.

Por ejemplo, usted puede utilizar las constelaciones que tienen diversas declinaciones, pero siempre con la ascensión recta entre 21h y 3h para el otoño, la misma idea con la ascensión derecha de 3h a 9h para el invierno, igual entre 9h y 14h para la primavera y finalmente hasta 14h a 21h para el verano).

Si decidimos considerar solamente una estación, puede ser difícil seleccionar una constelación entre, por ejemplo, 90°N y 60°N, otra entre 60°N y 40°N, otra entre 40°N y 20°N, y otra entre 20°N y 20°S y así sucesivamente sin solaparse hasta alcanzar la final entre 60°S y 90°S. Si también deseamos seleccionar constelaciones bien conocidas por todos, con estrellas brillantes, y que sean bastante grandes para cubrir el meridiano entero con una pequeña cantidad de ellas, puede ser difícil alcanzar nuestro objetivo. Pues el cielo no

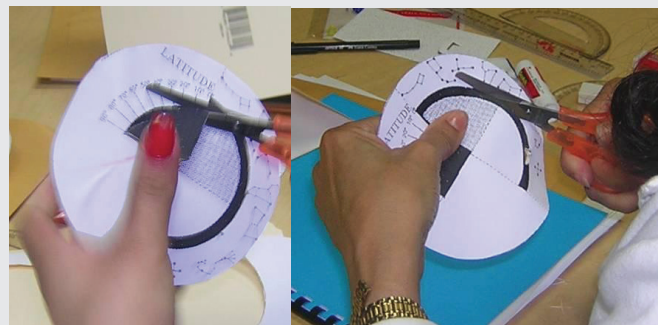


Fig. 3a y 3b: Construcción del simulador estelar

tiene la misma clase de constelación (grande, bien conocido y brillante) separada hacia fuera durante todo el año, puede ser mejor construir sólo un simulador y considerar las diversas ascensiones rectas al mismo tiempo.

Hay también otra discusión para construir un único simulador. Las diferencias relativas a las estaciones sólo tienen lugar en ciertas latitudes de ambos hemisferios.

Construcción del simulador

Para obtener un simulador robusto (figura 3a y 3b), es una buena idea pegar ambos pedazos (figuras 4 y 5) sobre cartulina antes de recortarlos. Es práctico construir un simulador dos veces más grande para uso del profesor.

Las instrucciones para construirlo aparecen abajo.

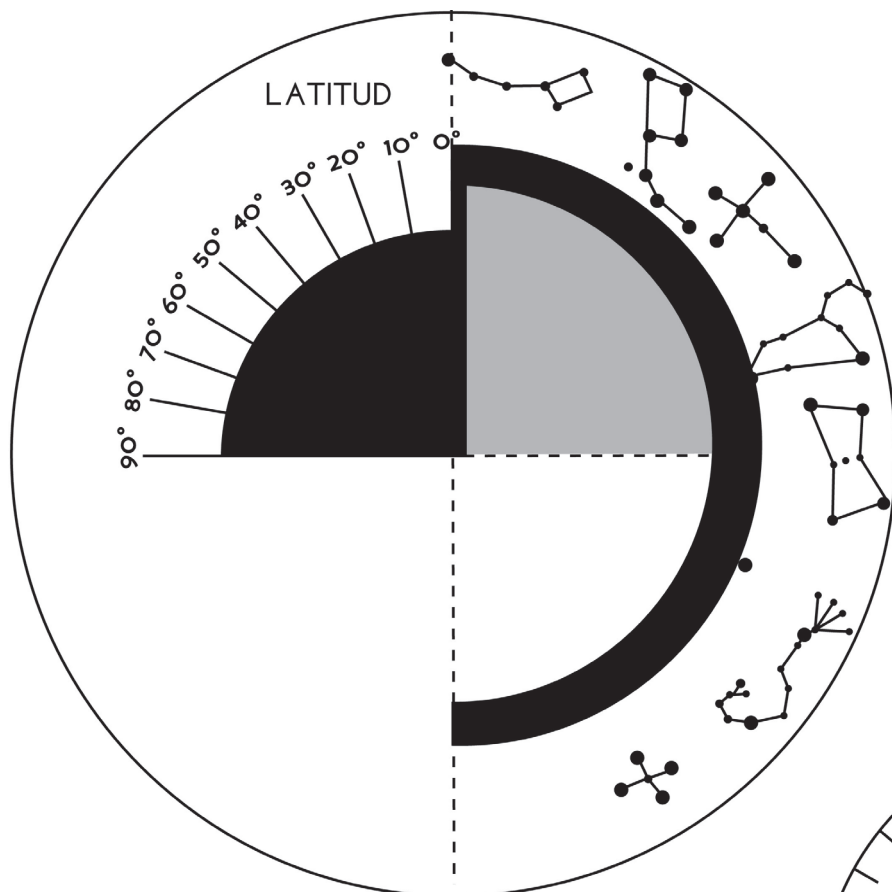


Fig. 4: Pieza principal del simulador estelar para el hemisferio norte.

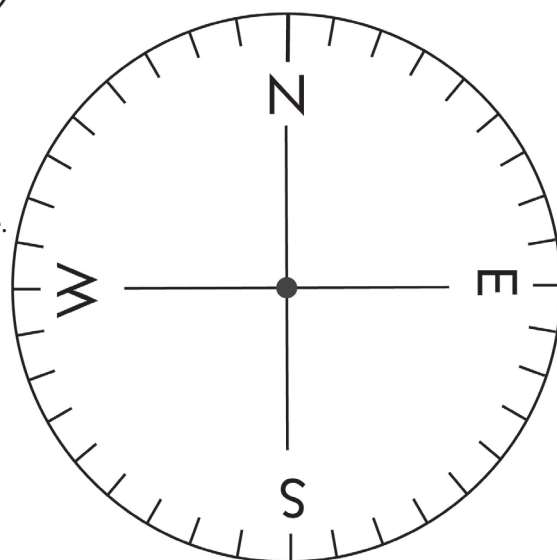


Fig. 5: Disco del horizonte.

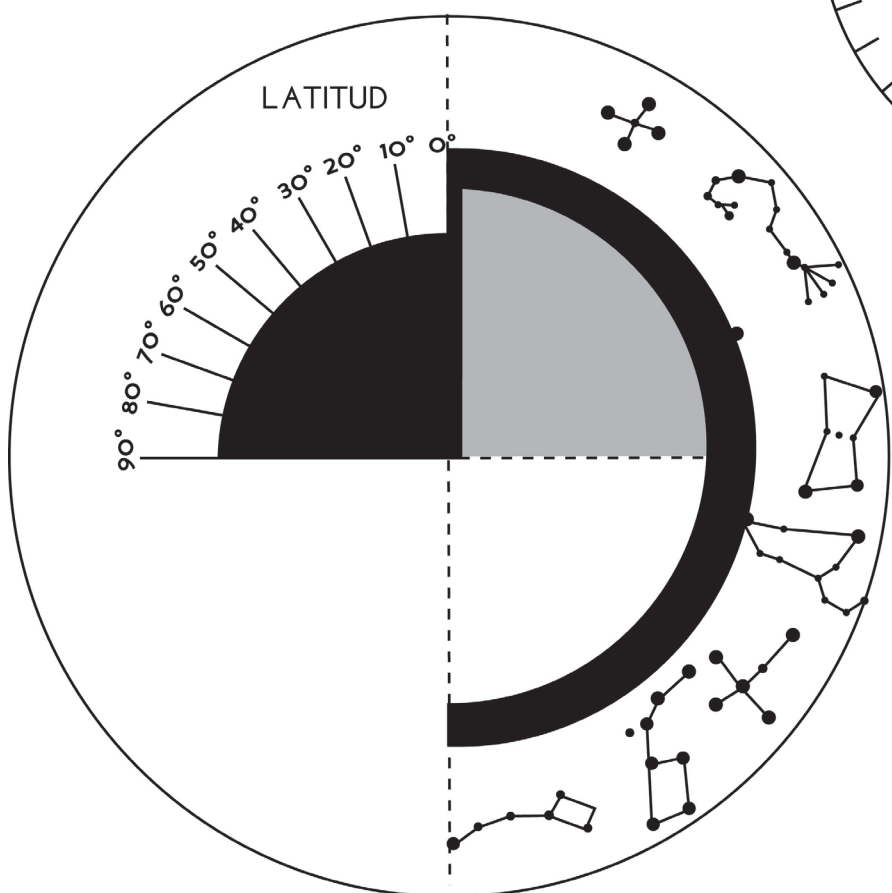


Fig. 6: Pieza principal del simulador estelar para el hemisferio sur.

Simulador para el Hemisferio Norte

- Haga una fotocopia de las figuras 4 y 5 en la cartulina.
- Recorte ambas piezas a lo largo de la línea continua (figuras 4 y 5).
- Quite el área negra del pedazo principal (figura 4).
- Doble la pieza principal (figura 4) a lo largo de la línea punteada recta. Es bueno doblar la pieza en varias ocasiones para un uso más fácil del simulador.
- Corte una muesca pequeña en la N del disco del horizonte (figura 5). Debe ser bastante grande para que la cartulina pase por ella.
- Pegue el cuadrante de Nordeste del disco del horizonte (figura 4) sobre el cuadrante gris de la pieza principal (figura 4). Es muy importante que al plegar el simulador el punto cardinal W quede en la **latitud 90°**.
- Cuando introducimos la marca N del disco del horizonte (figura 5) dentro de la zona de latitudes, el disco del horizonte debe permanecer perpendicular a la pieza principal.
- Es muy importante pegar las diversas piezas cuidadosamente para obtener la precisión máxima.

Simulador para el Hemisferio Sur

- Haga una fotocopia de las figuras 5 y 6 sobre cartulina.
- Recorte ambas piezas a lo largo de la línea continua (figuras 5 y 6).
- Quite el área negra de la pieza principal (figura 6).
- Doble la pieza principal (figura 6) a lo largo de la línea punteada. Es bueno doblarla en varias ocasiones para un uso más fácil del simulador.
- Corte una muesca pequeña en la S del disco del horizonte (figura 5). Debe ser bastante grande para que la cartulina pase por ella.
- Pegue el cuadrante del Sudoeste del disco del horizonte (figura 5) sobre el cuadrante gris de la pieza principal (figura 6). Es muy importante que cuando esta plegado, el punto cardinal E aparezca en la latitud 90°.
- Cuando introducimos la marca S del disco del horizonte (figura 5) dentro de la zona de latitudes, el disco tiene que permanecer perpendicular la pieza principal.
- Es muy importante pegar las diversas piezas cuidadosamente para obtener la precisión máxima.

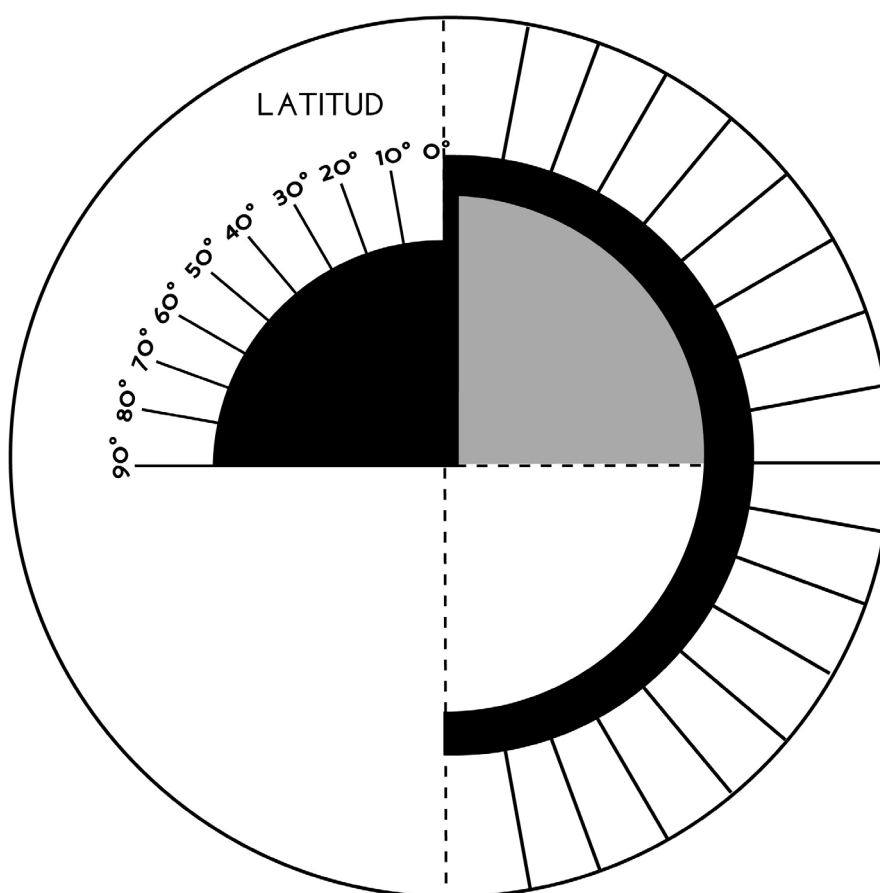


Fig. 7: Pieza principal del simulador estelar para cualquier hemisferio.

Todos pueden construir el simulador estelar que prefieran. Usted puede seleccionar las constelaciones que interesen por diversas razones. Por ejemplo, usted puede incluir solamente las constelaciones visibles para una única estación, o las constelaciones visibles solamente para un mes, etc. En este caso hay que considerar solamente las constelaciones con las ascensiones rectas entre dos valores específicos. Usted debe dibujar las constelaciones usando sus valores de la declinación en la figura 7. Tome en consideración que cada sector corresponde a 10° .

Aplicaciones del simulador

Para comenzar a utilizar el simulador hay que entrar la latitud deseada. Viajaremos por la superficie de la tierra en un viaje imaginario usando el simulador.

Hay que sujetar la pieza principal del simulador (figura 4) por el área en blanco (debajo del cuadrante de la latitud) con su mano izquierda. Seleccionada la latitud, hay que mover el disco del horizonte hasta que se corresponda con la latitud elegida. Con la mano derecha, se mueve la zona con las constelaciones dibujadas de derecha a izquierda varias veces. Se puede observar cuáles son las constelaciones que siempre están por encima del horizonte (circumpolares), las constelaciones que salen y se ponen, y cuáles de ellas están siempre debajo del horizonte (invisible).

- Inclínación de las trazas de las estrellas sobre el horizonte

Usando el simulador es muy fácil observar que el ángulo de las trazas de las estrellas sobre el horizonte depende de la latitud (figuras 8, 9 y 10)

Si el observador vive en el ecuador (latitud 0°) este ángulo es de 90° . Si el observador vive en el Polo Norte o el Polo Sur (latitud 90°N o 90°S), las trayectorias de las estrellas son paralelas al horizonte. Generalmente si el observador vive en una ciudad de latitud L , la inclinación de las trazas de las estrellas sobre el horizonte es $90-L$.

En las figuras 8, 9 y 10 podemos verificar esta situación. La foto de la figura 8a fue tomada en Laponia (Finlandia), la de la figura 9a en el Montseny (cerca de Barcelona, España) y la de la figura 10a en San Luis Potosí (México). La latitud en Laponia es mayor que en Barcelona y San Luis Potosí (México). La latitud en Laponia es mayor

que en Barcelona y San Luis Potosí pero la inclinación de la trayectoria de las estrellas es menor.



Fig. 8a y 8b: Trazas de las estrellas próximas a la puesta en Laponia 68°N (Finlandia), el ángulo de las trayectorias de las estrellas sobre el horizonte es 90° -latitud (la colatitud). Hay que observar que las trazas de las estrellas son más cortas que en la foto posterior, ya que la presencia de auroras boreales aconseja reducir el tiempo de exposición (Foto: Irma Hannula, Finlandia).

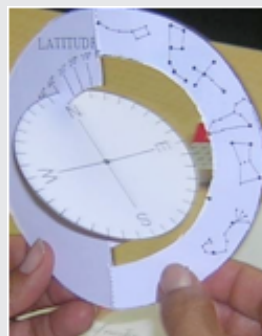


Fig. 9a y 9b: Trazas de las estrellas en la zona de la salida en el Montseny 41°N (cerca de Barcelona, España), el ángulo de la trayectoria de las estrellas sobre el horizonte es 90° -latitud (la colatitud). (Foto: Rosa M. Ros, España).



Fig. 10a y 10b: Trazas de las estrellas próximas al punto cardinal oeste en Matehuala 23°N (México), el ángulo de las trayectorias de las estrellas sobre el horizonte es 90° -latitud (la colatitud). (Foto: Luís J de la Cruz, México).

Usando el simulador se pueden realizar diversas actividades:

- 1) Si introducimos una latitud igual a 90°N , el observador está en el Polo Norte, y podemos ver que todas las constelaciones del hemisferio norte son circumpolares. Todas las del hemisferio sur son invisibles y no hay constelaciones con salida y puesta. Análogamente se puede hacer para 90°S y el Polo Sur.
- 2) Si la latitud es 0° , el observador está en el ecuador, y podemos ver que todas las constelaciones salen y se ponen (perpendicularmente al horizonte). Ninguna es circumpolar o invisible.
- 3) Si la latitud es 20° (N o S), hay menos constelaciones circumpolares que si la latitud es 40° (N o S). Pero hay mucho más estrellas que salen y se ponen.
- 4) Si la latitud es 60° (N o S), hay muchos más constelaciones circumpolares e invisibles, pero el número de las constelaciones que salen y se ponen se reduce si comparamos con una latitud de 40° (N o S).

Simulador solar: ¿por qué el Sol no sale por el punto cardinal Este?

No es simple explicar los movimientos del Sol observados de la Tierra. Los estudiantes saben que el Sol se levanta y se pone a diario, pero sienten una sorpresa cuando descubren que sale y se pone por diferentes puntos cada día. También es interesante considerar las distintas trayectorias solares de acuerdo con la latitud local. Y puede ser difícil intentar explicar el fenómeno del Sol de la medianoche o del paso solar por el cenit. Especialmente el simulador puede ser muy útil para entender el movimiento de la traslación y justificar las estaciones para algunas latitudes.

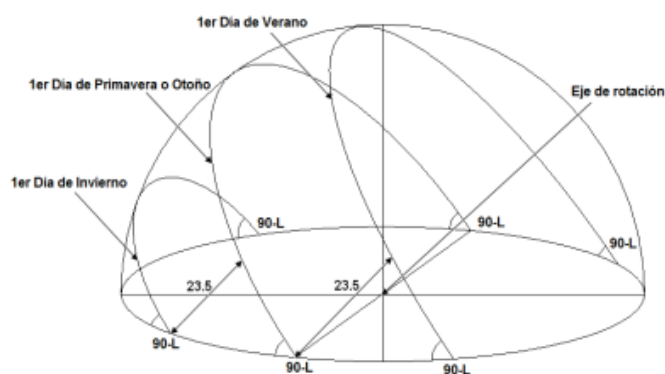


Fig. 11: Tres trayectorias diferentes del Sol (1er día de primavera u otoño, 1er día de verano y 1er día de invierno)

Construcción del simulador

Si deseamos construir el simulador solar, hay que considerar la declinación solar (que cambia diario). Entonces tenemos que construir un simulador que dé a los estudiantes la posibilidad de cambiar la posición del Sol de acuerdo con la época del año (según sea su declinación). Entonces para el primer día de primavera y de otoño, su declinación es 0° , el Sol se está moviendo en el ecuador. El primer día del verano, la declinación del Sol es positiva $+23.5^{\circ}$ y el primer día del invierno es negativa -23.5° (figura 11). Es necesario cambiar este valor en el modelo si deseamos utilizarlo para estudiar las trayectorias del Sol.

Para obtener un simulador robusto (figuras 12a y 12b), es una buena idea pegar ambos pedazos sobre cartulina antes de recortarlos. Es una buena idea construir uno de ellos dos veces mas grande para uso del profesor o monitor (así se podrán seguir mejor las explicaciones aunque se este situado un poco más lejos).

Las instrucciones de construirlo aparecen seguidamente.



Fig. 12a y 12b: Preparación del simulador para el hemisferio norte con la latitud $+40^\circ$

Simulador para el Hemisferio Norte

- Haga una fotocopia de las figuras 13 y 14 sobre cartulina.
- Corte ambas piezas a lo largo de la línea continua (figuras 13 y 14).
- Quite el área negra del pedazo principal (figura 13).
- Doble la pieza principal (figura 13) a lo largo de la línea punteada. Es a veces una buena idea doblarla repetidamente para un uso más fácil del simulador.
- Corte una muesca pequeña en la N del disco del horizonte (figura 14). Debe ser bastante grande para que el grueso de la cartulina pase con él.
- Pegue el cuadrante de Nordeste del disco del horizonte (figura 14) sobre el cuadrante gris de la pieza principal (figura 13). Es muy importante tener la línea Norte-Sur según la línea de doblez de la pieza principal y el punto cardinal W debe coincidir con la latitud 90° .
- Cuando introducimos la marca N del disco del horizonte (figura 14) dentro de la zona de la

latitud, el disco del horizonte tiene que permanecer perpendicular a la pieza principal.

- Es muy importante pegar las piezas cuidadosamente para obtener la precisión máxima.
- Para poner el Sol en el simulador, pinte un círculo rojo sobre un pedazo de papel. Córtele y fíjelo entre dos pedazos de cinta transparente adhesiva. Ponga esta franja transparente en el área de la declinación de la figura 13. La idea es que será fácil mover esta franja hacia arriba y hacia abajo de esta área para situarla en el mes deseado.

Simulador para el Hemisferio Sur

- Haga una fotocopia de las figuras 14 y 15 sobre cartulina.
- Corte ambas piezas a lo largo de la línea continua (figuras 14 y 15).
- Quite el área negra de la pieza principal (figura 15).
- Doble la pieza principal (figura 15) a lo largo de la línea punteada. Es a veces una buena idea doblarla repetidamente para un uso más fácil del simulador.
- Corte una muesca pequeña en el S del disco del horizonte (figura 14). Debe ser bastante grande para que el grueso de la cartulina pase con él.
- Pegue el cuadrante del Sudoeste del disco del horizonte (figura 14) sobre el cuadrante gris de la pieza principal (figura 15). Es muy importante tener la línea Norte-Sur según la línea de doblez de la pieza principal y el punto cardinal E debe coincidir con la latitud 90° .
- Cuando introducimos la marca S del disco del horizonte (figura 14) dentro de la zona de la latitud, el disco tiene que permanecer perpendicular a la pieza principal.
- Es muy importante pegar las diversas piezas cuidadosamente para obtener la precisión máxima.
- Para poner el Sol en el simulador, pinte un círculo rojo en un pedazo de papel. Córtele y fíjelo entre dos pedazos de cinta transparente. Ponga esta franja transparente en el área de la declinación de la figura 15. La idea es que será fácil mover esta franja hacia arriba y hacia abajo de esta área para situarla en el mes deseado.

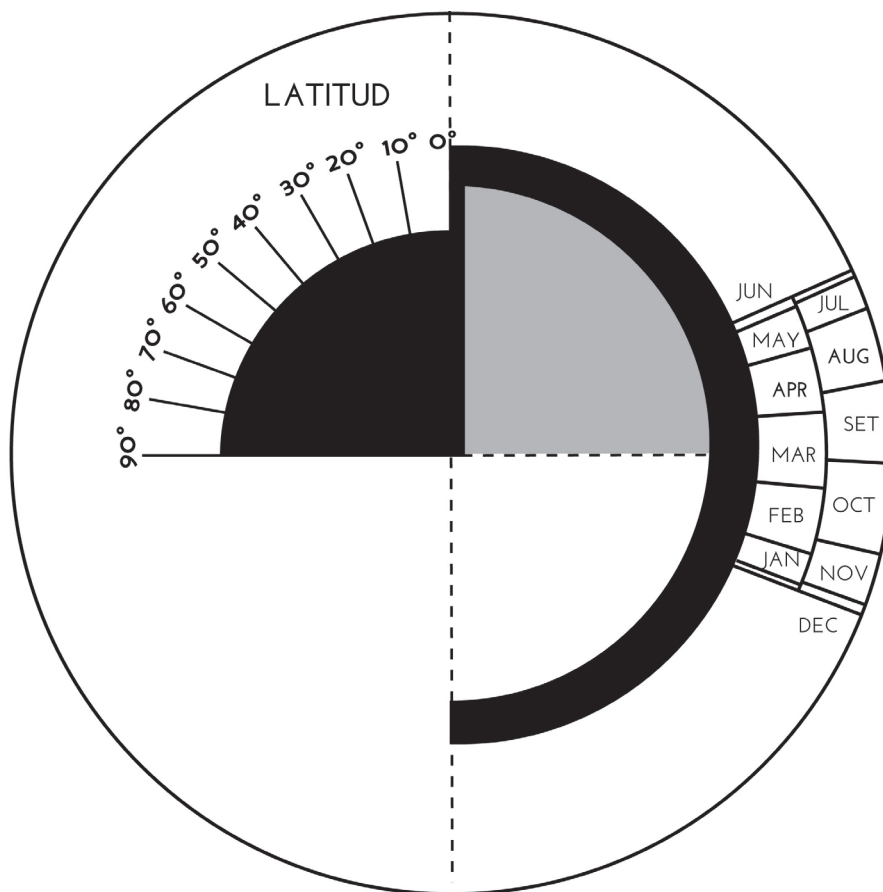


Fig. 13: Pieza principal del simulador solar para el hemisferio norte.

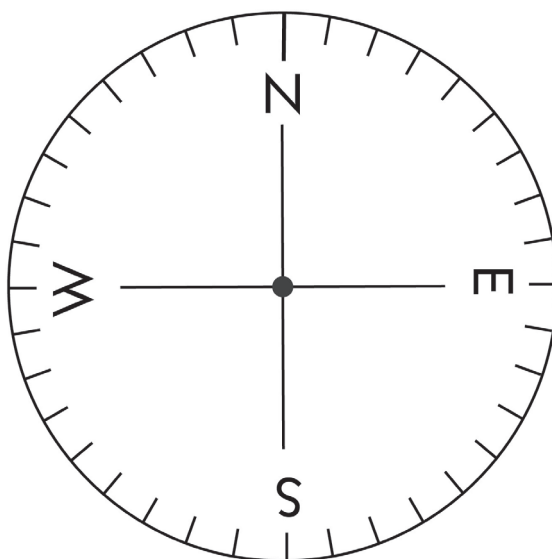


Fig. 14: Disco del horizonte.

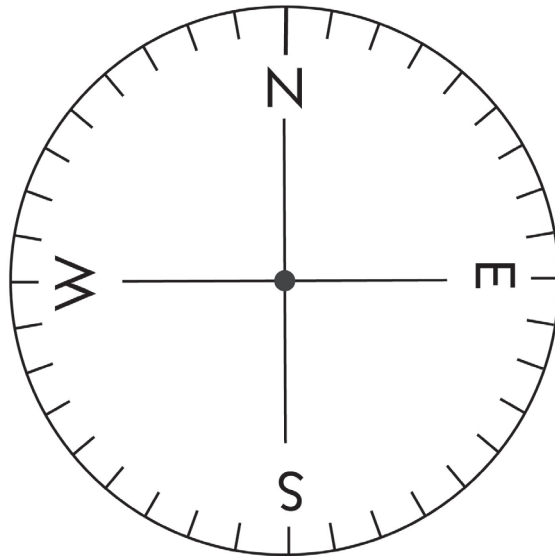


Fig. 14: Disco del horizonte.

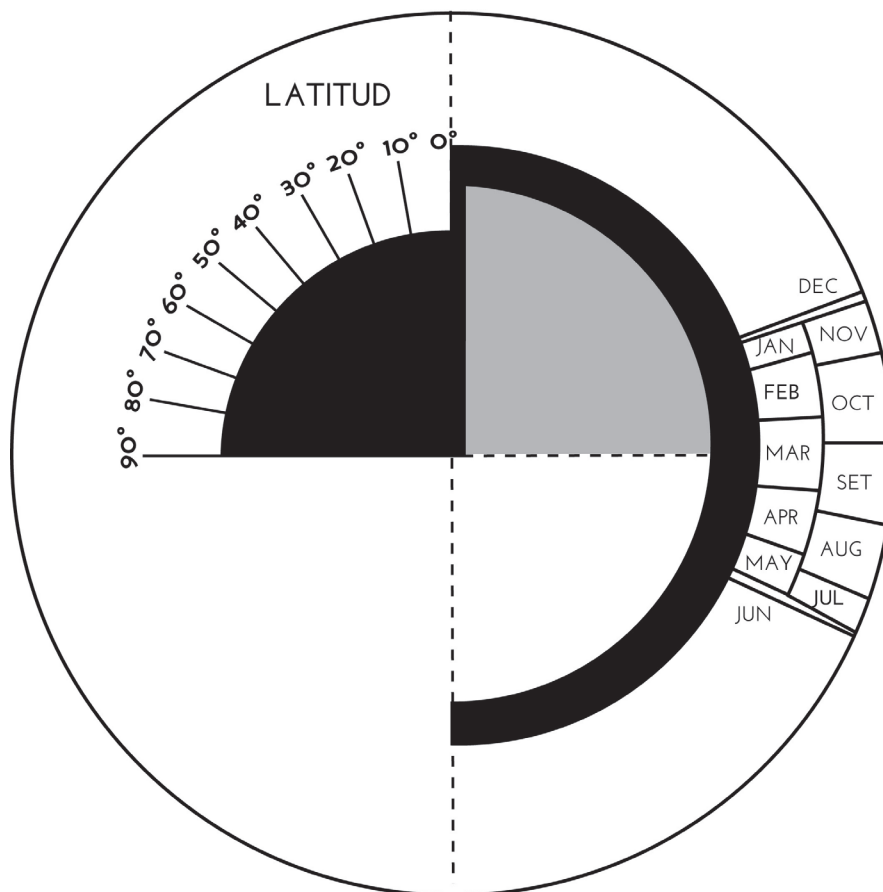


Fig. 15: Pieza principal del simulador para el hemisferio sur.

Usos del simulador

Para comenzar a utilizar el simulador usted tiene que entrar la latitud seleccionada.

Viajaremos en la superficie de la Tierra en un viaje imaginario usando el simulador.

Consideraremos 3 áreas:

1. Lugares en el área Intermedia del hemisferio norte o sur
2. Lugares en las áreas polares
3. Lugares en las áreas ecuatoriales

1.- Lugares en el área intermedia del hemisferio norte o sur: ESTACIONES

- Inclinación de la trayectoria del Sol sobre el horizonte

Usando el simulador es muy fácil observar que el ángulo de la trayectoria del Sol sobre el horizonte depende de la latitud. Si el observador vive en el ecuador (latitud 0°) este ángulo es 90° . Si el observador está viviendo en Polo Norte o Polo Sur (latitud 90° o -90°), la trayectoria del Sol es paralela al horizonte. Generalmente si el observador vive en una ciudad de la latitud L , la inclinación de la trayectoria del Sol en el horizonte es $90-L$ cada día. En las figuras 16a y 16b podemos verificar esta situación. La fotografía de la figura 16a fue tomada en Laponia (Finlandia) y la figura 17a en Gandía (España). La latitud en Laponia es mayor que en Gandía, pero la inclinación de la trayectoria del Sol es más pequeña. La fotografía de la figura 18a se realizó en Ladrilleros (Colombia) con una latitud de 4° y en consecuencia la inclinación de la trayectoria solar es próxima a la perpendicularidad, es de 86° .

- Altitud de la trayectoria del Sol dependiendo de las estaciones

1a) Para el hemisferio norte.

Usando el demostrador para su ciudad (entre la latitud de su ciudad), es fácil verificar que la altitud del Sol sobre del horizonte cambia de acuerdo con la estación. Por ejemplo, el primer día de primavera, la declinación del Sol es 0° . Si situamos el Sol en el 21 de marzo y movemos el Sol, exactamente sobre el ecuador, desde el horizonte del Este al Sur y al Oeste, podemos ver que la trayectoria del Sol tiene una altitud determinada sobre el horizonte.

Si para la misma latitud del lugar repetimos el experimento para el primer día de verano el 21

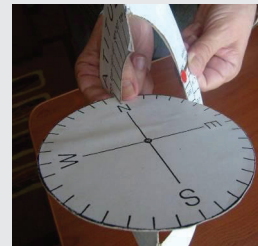


Fig. 16a y 16b: Salida del Sol en Enontekiö en Laponia (Finlandia), el ángulo de la trayectoria del Sol sobre el horizonte es el colatitud ($90^\circ - 68^\circ = 22^\circ$). (Foto: Sakari Ekko, Finlandia).

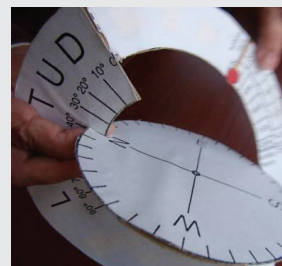
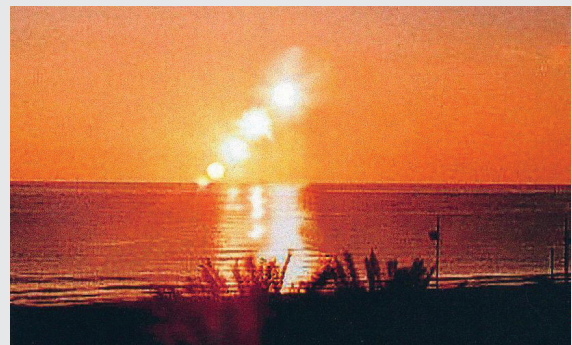


Fig. 17a y 17b: Salida del Sol en Gandía (España) con latitud de 41° N, el ángulo de la trayectoria solar sobre el horizonte es 49° . Moviéndolo rápidamente el simulador es posible mostrar la inclinación de la trayectoria del Sol. (Foto: Rosa M. Ros, España).

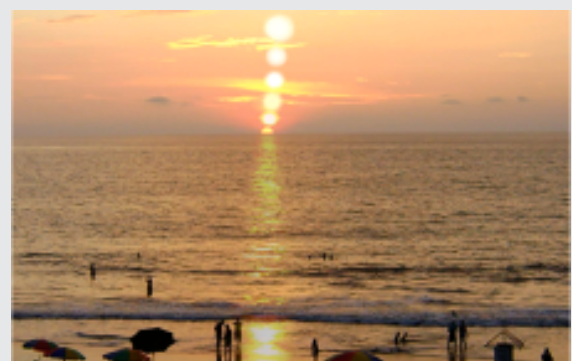


Fig. 18a y 18b: Salida del Sol en Ladrillero (Colombia), el ángulo de la trayectoria del Sol sobre el horizonte es el colatitud ($90^\circ - 4^\circ = 86^\circ$). (Foto: Mario Solarte, Colombia).

de diciembre, (declinación $-23^{\circ}5$), cuando movemos el Sol en el paralelo respectivo desde la zona del Este en el horizonte al Sur y al Oeste, podemos observar que la trayectoria del Sol es superior que en el primer día de primavera, el 23 de septiembre. Finalmente repetimos el experimento, para la misma latitud también, en el caso del primer día de invierno el 21 de junio, (declinación $+23^{\circ}5$). Podemos ver que en este caso la trayectoria del Sol esta por debajo. El primer día de primavera la declinación es 0° y la trayectoria del Sol coincide con el ecuador de una manera similar al primer día de otoño, el 21 de marzo.

Por supuesto si cambiamos la latitud, la altitud de las trayectorias del Sol cambia, pero la más alta corresponde siempre al primer día del verano y la más baja al primer día de invierno (figura 19a y 19b).



Fig. 19a y 19b: Trayectorias del Sol el primer día de verano y de invierno en Noruega. Es evidente que el Sol se está moviendo más arriba en el verano que en invierno, y que hay mucho más horas de la luz del Sol durante verano.

1a) Para el hemisferio sur

Usando el demostrador para su ciudad (entre la latitud de su ciudad), es fácil verificar que la altitud del Sol sobre del horizonte cambia de acuerdo con la estación. Por ejemplo, el primer día de primavera, la declinación del Sol es 0° . Si situamos el Sol en el 23 de septiembre y movemos el Sol, exactamente sobre el ecuador, desde el horizonte del Este al Norte y al Oeste, podemos ver que la trayectoria del Sol tiene una altitud determinada sobre el horizonte.

Si para una misma latitud del lugar consideramos el Sol el primer día del verano el 21 de diciembre, (declinación $-23^{\circ}5$), cuando movemos el Sol en el paralelo respectivo desde la zona del Este en el horizonte al Sur y al Oeste, podemos

observar que la trayectoria del Sol es superior que en el primer día de primavera, el 23 de septiembre. Finalmente repetimos el experimento, para la misma latitud también, en el caso del primer día de invierno el 21 de junio, (declinación $+23^{\circ}5$). Podemos ver que en este caso la trayectoria del Sol esta por debajo. El primer día de primavera la declinación es 0° y la trayectoria del Sol coincide con el ecuador de una manera similar al primer día de otoño, el 21 de marzo. Por supuesto si cambiamos la latitud, la altitud de las trayectorias del Sol cambia, pero la más alta es siempre primer día de verano y la más baja es el primer día de invierno.

Notas:

- Cuando la altitud del Sol (en verano) es máxima la luz y la radiación solar "incide" más perpendicular sobre el horizonte. En este caso la energía se concentra en un área más pequeña y nuestra sensación es que en este período el clima es más caliente.
- También en el periodo veraniego el número de horas de luz solar es mayor que en invierno, esta razón motiva que también aumente la temperatura durante el verano.

- El Sol sale y se pone en un lugar diferente cada día

Si en el experimento anterior prestamos atención en la zona de las salidas del Sol y/o en las zona de las puestas de Sol podemos observar que el Sol sale y se pone en un lugar diferente hoy, que ayer y que mañana. Particularmente la distancia entre las salidas del Sol (o las puestas) del primer día de dos estaciones consecutivas aumenta con la latitud (figuras 20a, 20b y 20c).

Es muy sencillo simular esta observación con el modelo. Es suficiente marcar la posición del Sol en cada estación para dos lugares diferentes, por ejemplo de 60° , 40° y 0° de latitud (figuras 21a, 21b y 21c).

Las fotografías presentadas (figuras 20a, 20b y 20c) corresponden al hemisferio norte pero la situación es similar en el hemisferio sur (figuras 22a, 22b y 22c). Solo cambia la posición de las estaciones.

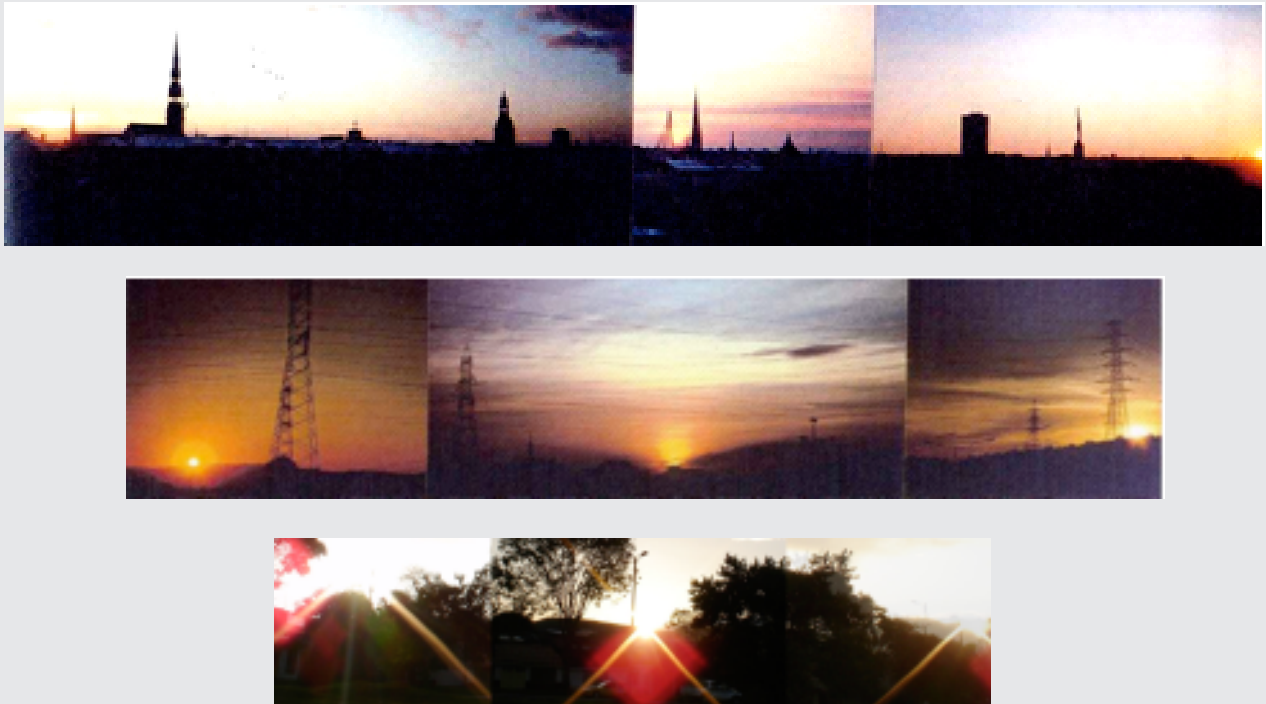


Fig. 20a, 20b y 20c: Puestas del Sol en Riga 57° (Latvia), Barcelona 41° (España) y Popayán 2° (Colombia) el primer día de cada estación (izquierda/invierno, centro/primavera o otoño, derecha/verano). Las puestas de Sol centrales en ambas fotos están en la misma línea, es fácil observar que las puestas de Sol de verano y de invierno en Riga (latitud mayor) están mucho más lejanas que en Barcelona y más que en Popayán (Fotos: Ilgonis Vilks, Letonia, Rosa M. Ros, España y Juan Carlos Martínez, Colombia).



Fig. 22a, 22b y 22c: Puestas de Sol en Popayán 2° (Colombia), La Paz -19° (Bolivia) y Esquel -43° (Argentina) el primer día de cada estación (izquierda/verano, centro/primavera y/o otoño, derecha/invierno). Las puestas de Sol centrales en ambas fotos están en la misma línea, es fácil observar que las puestas del Sol del verano y del invierno en Esquel (latitud mucho más negativa) están mucho más alejadas que en La Paz. (Fotos: Juan Carlos Martínez, Colombia, Gonzalo Pereira, Bolivia y Néstor Camino, Argentina)



Fig. 21a: El Sol sale el primer día de primavera y/o otoño, Fig. 21b: El Sol sale el primer día de verano y Fig. 21c: El Sol sale el primer día de invierno.

Notas:

- El Sol no sale por el punto cardinal Este y no se pone por el punto cardinal Oeste. Esta es una idea generalmente aceptada pero realmente no es cierta. Solamente es correcto 2 días concretos por año: el primer día de primavera y el primer día de otoño en todas las latitudes el Sol sale y se pone exactamente en los puntos Este y Oeste respectivamente.
- Hay otra idea muy interesante que la gente no sabe, pero que se cumple cada día en todas las latitudes. El Sol pasa para el punto cardinal del Sur al mediodía (por supuesto en tiempo solar). Esta característica se puede utilizar para la orientación.

2.- Lugares en áreas polares: SOL DE MEDIANOCHE

- Verano e invierno polar

Si introducimos la latitud polar ($+90^\circ$ o -90°) dependiendo de si nosotros consideramos la demostración para el hemisferio norte o para el hemisferio sur) en el simulador, tenemos tres posibilidades. Si la declinación del Sol es 0° , el Sol se está moviendo en el horizonte que es también el ecuador.

Si la declinación corresponde al primer día de verano, el Sol se está moviendo en un paralelo al horizonte. Realmente tenemos el Sol moviéndose en varios paralelos sobre el horizonte desde el segundo día de primavera hasta el último día de verano. Eso significa medio año de luz solar.

El primer día de otoño, el Sol se está moviendo otra vez en el horizonte o en el ecuador. Pero a partir del segundo día de otoño hasta el día último día de invierno, el Sol se está moviendo en diversos paralelos todos por debajo del horizonte. Eso significa medio año de noches.

Por supuesto el ejemplo anterior corresponde a la situación extrema. Hay algunas otras latitudes donde las trayectorias del Sol no son paralelas al horizonte, pero no tiene salidas ni puestas de Sol porque la latitud local es demasiado más alta para ello. En este caso podemos observar el Sol de la medianoche.

- Sol de medianoche

Si introducimos en la latitud del simulador $+70^\circ$ para el hemisferio norte (o -70° en el hemisferio sur) podemos simular el Sol de la medianoche sin ningún problema. Si situamos el Sol el primer día de verano, el 21 de junio en el hemisferio norte (o el 21 de diciembre en el hemisferio sur), podemos ver que el Sol no sale ni se pone este día.

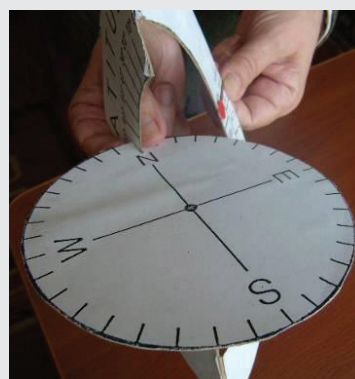


Fig. 23a y 23b: Trayectoria del Sol de medianoche en Lapponia (Finlandia). El Sol va bajando hacia el horizonte pero no se pone hasta que el Sol comienza a subir de nuevo. (Foto: Sakari Ekko).

La trayectoria del Sol es tangente al horizonte, pero nunca esta por debajo de él. Este fenómeno se llama “Sol de la medianoche”, porque es posible observar el Sol también en la medianoche (figuras 23a y 23b).

En particular, en las latitudes polares ($+90^\circ$ o -90°) el Sol aparece sobre el horizonte durante la mitad del año y por debajo del mismo la otra mitad. Usando el simulador es muy fácil entender esta situación (figuras 24a y 24b).



Fig. 24a y 24b: Simulador con el Sol por encima del horizonte para medio año y por debajo para la otra mitad.

3.- Lugares en el área ecuatorial: PASO CENTAL DEL SOL

- Paso del Sol por el cenit

En la zona ecuatorial las estaciones no se aprecian. La trayectoria solar es siempre prácticamente perpendicular al horizonte y la altitud solar es prácticamente igual durante todo el año y la duración de los días es también muy similar. Entonces las estaciones no son interesantes para los habitantes (figuras 25a, 25b y 25c).

Por otra parte en los países tropicales hay algunos días especiales: los días que el Sol pasa por el cenit. Esos días la luz del Sol llega del cenit como una ducha. La temperatura es más caliente y la sombra de la gente desaparece debajo de sus zapatos (figura 26a). Esos días eran especialmente considerados por las culturas antiguas porque podían ser apreciados por todos. Ahora también se consideran, realmente hay dos días por año en que el Sol se encuentra en el cenit. Usando el simulador podemos mostrar este fenómeno y también es posible calcular (aproximadamente) en que día va a tener lugar para una determinada latitud (figura 26b).

A modo de ejemplo (figura 26b), si simulamos un lugar de la latitud 15°N , usando el simulador podemos calcular aproximadamente qué días estará el Sol en el cenit al mediodía. Es solamente

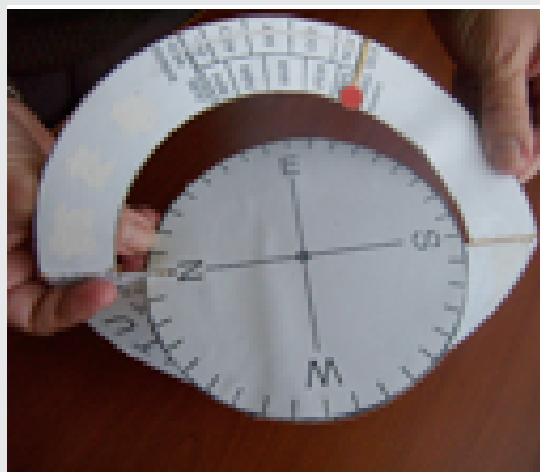


Fig. 25a, 25b y 25c: En el ecuador los movimientos del Sol corresponden a trayectorias perpendiculares al horizonte. El Sol sale el primer día de cada estación: izquierda) primer día de verano, centro) primer día de primavera y/o otoño y derecha) primer día de invierno. Las distancias entre los tres puntos de salida del Sol el primer día de cada estación son mínimas. Esta distancia es sólo de $23^\circ.5$, la oblicuidad de la eclíptica. Para latitudes mayores las trayectorias solares se inclinan y las distancias entre las tres salidas del Sol aumentan (figuras 20a, 20b, 20c, 22a, 22b y 22c).

necesario utilizar un palillo perpendicular al disco del horizonte. Por ejemplo en la figura 26b se observa que para Honduras el paso por el cenit es a finales de abril y a mediados de agosto.

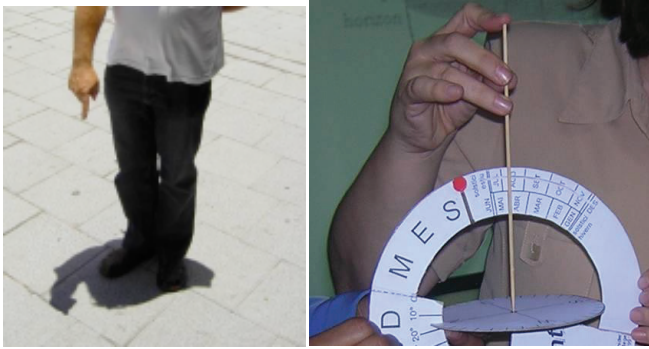


Fig. 26a: Sombra reducida (próxima al cenit) Fig. 26b: Simulando el paso solar para el cenit en Honduras (latitud 15°).

Simulador XXL

Evidentemente el modelo presentado puede realizarse en otros materiales, por ejemplo en madera. Entonces se puede producir con una luz en la posición del Sol (figura 27a). Con una cámara fotográfica es posible visualizar las trayectorias del Sol si se da un tiempo de exposición largo (figura 27b).

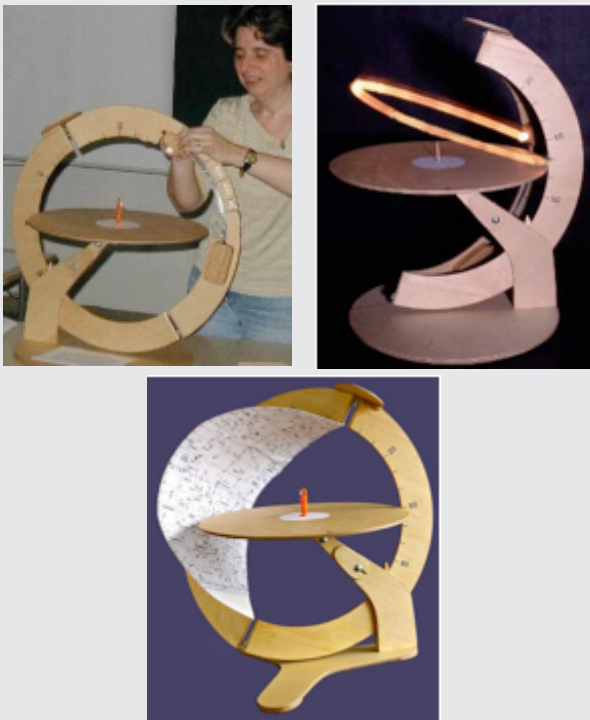


Fig. 27a: Simulador de mayor tamaño hecho en madera. Fig. 27b: Con una cámara fotográfica y una larga exposición es posible simular la trayectoria solar. Fig. 27c: Simulador estelar en madera (Fotos: Sakari Ekko).

Simulador para mostrar la tierra paralela

Es posible introducir una pelota de ping pong en el simulador y así poder dar explicaciones sencillas de movimiento ánuo del Sol como se hace con el modelo de la Tierra paralela. Para ello usaremos una pelota similar a las de ping pong en lugar del

círculo del horizonte y se modificara la pieza principal introduciendo dos soportes para mantener tensa una goma que sostiene la pelota centrada (figura 28).

Agujerearemos la bola de ping-pong, o similar, diametralmente a modo de eje de rotación y la sujetaremos a la pieza principal tal y como se puede ver la figura 30.



Fig. 28: Simulador con una pelota para simular la tierra paralela.

A la vez se suprime el círculo de latitudes por carecer de interés en esta ocasión ya que se usa toda la esfera terrestre simulada con la pelotita de ping pong (figura 29). Situaremos entonces una linterna o la linterna de un móvil en el mes correspondiente a la situación del Sol (donde se indica la declinación del Sol). Cuando trabajamos en el hemisferio sur esta pieza es análoga con los meses ordenados a la inversa (figura 30).

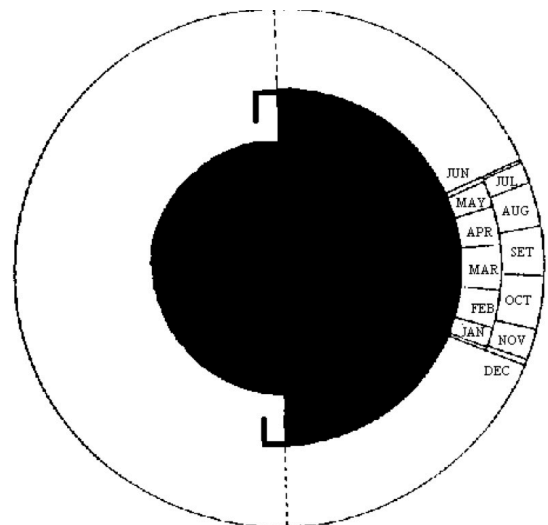


Fig. 29: Pieza única del simulador donde se fija la pelota de ping pong, para el hemisferio norte. Es necesario pegar esta fotocopia sobre una cartulina un poco gruesa para tener fuerza para sujetar la pelota.

Situando una linterna en la posición del equinoccio de verano, se puede observar que la zona del polo norte está iluminada y la del polo sur no (figura 31). Con la linterna en los equinoccios, la línea luz/sombra pasa exactamente por los polos norte y sur (figura 32). Finalmente situando la linterna en el solsticio de invierno, se observa la zona del polo sur iluminada y la zona norte a oscuras (figura 33).

Realmente este pequeño simulador permite dibujar los círculos polares ártico y antártico como círculos generados por los bordes de las zonas de luz/sombra.

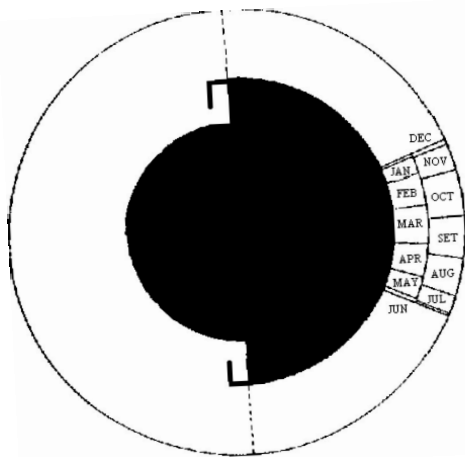


Fig. 30: Pieza única del simulador donde se fija la pelota de ping pong, para el hemisferio sur. Es necesario pegar esta fotocopia sobre una cartulina un poco gruesa para tener fuerza para sujetar la pelota.

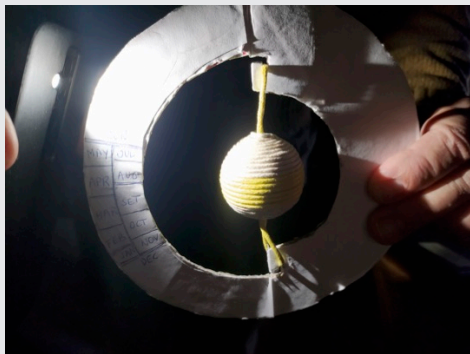


Fig. 31: Verano en el Hemisferio Norte e Invierno en el Hemisferio Sur.

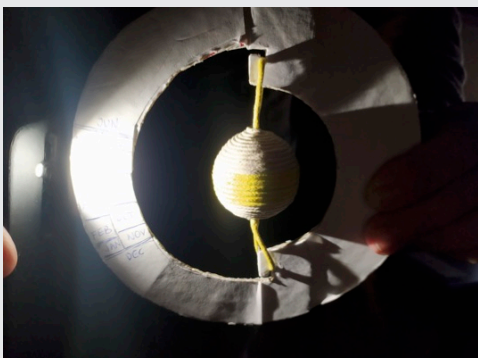


Fig. 32: Equinoccios en los dos Hemisferios



Fig. 33: Invierno en el Hemisferio Norte y verano en el Hemisferio Sur.

Simulador lunar : ¿Por qué, a veces, la Luna sonríe?

Cuando trabajamos la Luna con estudiantes, comenzamos explicándoles las características de la Luna, sus fases y también hablamos de los eclipses. Las fases de la Luna son muy espectaculares y es fácil explicarlas por medio de una esfera y de una linterna.

En consecuencia, los modelos como los de la figura 34 ofrecen una imagen de la Luna creciente (entorno al Cuarto creciente) y decreciente (entorno al Cuarto menguante). Recordemos la regla nemotécnica que da la Luna creciente como una "C" y la menguante o decreciente como una "D" que es cierta para los habitantes del hemisferio sur, pero que no se puede utilizar en el hemisferio norte donde se suele decir que la Luna es una "mentirosa".

Modelos como el de la figura 35 ofrecen una visión de la Luna creciente y decreciente como una "C" o "D" (dependiendo de las fases). Entonces podemos imaginarnos que en el horizonte puede ser observado como la figura 35. Pero según los países es posible observar la Luna como una "C inclinada", una "D" inclinada (figura 36a) o en otros casos como una "U" o como una "Luna sonriente" (figura 36b). ¿Cómo podemos dar una explicación sencilla y clara de este fenómeno? Bastará un sencillo simulador para entender los diversos aspectos de la Luna en las diversas latitudes.

Si queremos estudiar los movimientos de la Luna, debemos tener en cuenta también su posición respecto del Sol (que es el causante de sus fases) y de su declinación (puesto que ella

cambia también todos los días, y mucho más de prisa que la del Sol). Debemos pues, construir un simulador que de a los estudiantes la posibilidad de cambiar fácil-mente la posición de la Luna, si ella esta más o menos próxima a las sucesivas posiciones respecto al Sol, a una declinación que varia considerable-mente a lo largo de un mes. En efecto, vista desde la Tierra, y en medio de las estrellas, la Luna describe en un mes una trayectoria bastante próxima al Sol en un año, siguiendo la línea de la “eclíptica” (con una aproximación de 5° , en más o menos debida a la inclinación de su órbita).

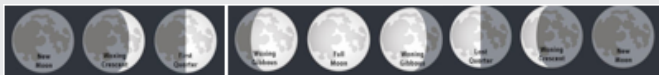


Fig. 34: Fases de la Luna



Fig. 35: Simulación de las fases de la Luna en el horizonte

La Luna está “al lado” del Sol cuando es Luna nueva. Cuando es Luna llena está en un punto opuesto de la eclíptica, y su declinación es opuesta a la del Sol (con un error de 5°). Por ejemplo, en el solsticio de junio, la Luna llena se encuentra algo después de donde se encontraría el Sol en el solsticio de diciembre y su declinación es negativa (entre -18° y -29°). El movimiento diurno de la Luna llena en junio, es pues proximo al del Sol en diciembre.

Si consideramos el cuarto creciente, en forma de “D” en el hemisferio norte, de “C” en el hemisferio sur sabemos entonces, que la Luna esta a 90° del Sol, más “lejos” sobre la eclíptica, o si se quiere, donde se encontrará el Sol 3 meses después: así, en junio, la luna del cuarto creciente tendrá una declinación próxima a la declinación del Sol en septiembre (0°), en el mes de septiembre, una declinación próxima a la del Sol en diciembre ($-23,5^\circ$), etc...

Si consideramos el cuarto decreciente o menguante, en forma de “C” para el hemisferio norte, o de “D” en el hemisferio sur, sabemos que enton

ces, la Luna esta también a 90° del Sol sobre la línea de la eclíptica, pero retrasada respecto a él, es decir, estará donde se encontraba el Sol 3 meses antes. Así en junio, la Luna decreciente tendrá una declinación próxima a la declinación del Sol en el mes de marzo (0°); en septiembre, próxima a la del Sol de junio ($+23,5^\circ$) etc...



Fig. 30a: Cuarto de Luna inclinada, Fig. 30b: Cuarto de Luna sonriente.

Construcción del simulador

El simulador lunar se realiza a partir del simulador solar. Como en el anterior, es necesario un modelo para simular las observaciones desde el hemisferio norte, y otro para el hemisferio sur (figuras 13 y 14 para el hemisferio norte y 13 y 15 para el hemisferio sur). También es una buena idea construir uno de ellos que sea dos veces más grande para uso del profesor o monitor.



Fig. 37a: Uso del simulador.

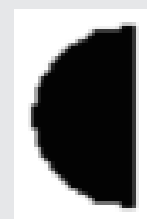


Fig 37b: Cuarto de Luna.

Instalaremos, por ejemplo, sobre el simulador solar una Luna en cuarto menguante, (en forma de "C" para el hemisferio norte, o en forma de "D" para el hemisferio sur) en el lugar del Sol y obtendremos un simulador lunar. Según las instrucciones siguientes.

Para situar la Luna en el simulador, recorte la figura 37b (Luna en cuarto) y pegue dos pedazos de cinta transparente de forma que queda la Luna en medio de ellos bien orientada ("C" o "D" según la fase elegida). Ponga esta franja transparente en el área del mes de la figura 12 ó 14. La idea es que sea fácil mover esta franja hacia arriba y hacia abajo en esta área, para situarla en el mes deseado.

Usos del simulador lunar

Para comenzar a utilizar el simulador hay que entrar la latitud deseada. Viajaremos en la superficie de la Tierra en un viaje imaginario usando el simulador.

Hay que sujetar con la mano izquierda la pieza principal del simulador (figuras 38a y 38b) por la zona que está en blanco (debajo del cuadrante de la latitud). Seleccionada la latitud, mueva el disco del horizonte hasta que alcance la latitud elegida. Elegir el día para el cual queremos simular el movimiento del cuarto menguante o decreciente. Añadir 3 meses a ese valor y situar la Luna en la fase del cuarto (figura 37b) cara al mes obtenido: en este lugar es donde se encontrará el Sol dentro de 3 meses!. Con la mano derecha desplazar el disco que sujeta la Luna del Este hacia el Oeste.

Con el simulador del "hemisferio norte", se puede ver que según sea la latitud y el día del año, la Luna en su cuarto decreciente aparecer saliendo por el horizonte (hacia la medianoche) como una "C" o una "U" sobre el horizonte (donde hemos situado un muñequito).

- Si introducimos una latitud de 70° podemos ver la Luna como una "C" móvil de la zona Este hacia la zona Oeste. No importa el período del año. En cada estación la Luna parece una "C" (figura 38a).
- Si la latitud es 20°, el observador está cercano a la línea tropical, y podemos ver la Luna que sonríen como un "U" algo inclinada. La Luna se está moviendo en una forma más perpendicular al horizonte que en el ejemplo anterior (figura 38b). La forma de "U" no cambia con el mes.



Fig. 38a: Simulador para 70° la latitud Norte



Fig. 38b: 20° de la latitud Sur

- Si la latitud es de + 90°, el observador está en el Polo Norte y según sea el día considerado:
 - Se puede ver la Luna como una "C" que se mueve en una trayectoria paralela al horizonte.
 - No se puede ver, pues su trayectoria está por debajo del horizonte.
- Si la latitud es 0°, el observador está en el ecuador, y podemos ver la Luna que sonríen como una "U". La Luna sale y se pone perpendicular al horizonte. Ella se ocultará (hacia el mediodía) en forma de « U » y regresará: « ∩ »...

Para otros observadores que vivan en las latitudes intermedias, las Lunas salen y se ponen en una posición intermedia entre "C" y "U" que sea más o menos inclinada según sea la latitud del lugar de observación.

Los comentarios anteriores se pueden repetir análogamente para la Luna en forma de "D" recordando corregir el día (en este caso habrá que quitarle 3 meses) al situarla en la posición del Sol.

- Si introducimos un -70 ° de latitud (o 70 ° sur) podemos ver la Luna decreciente como una "D" que se desplaza de la zona Este hacia la zona Oeste.. Esto no depende de la época del año. En todas las estaciones Luna dibuja una "D" (figura 38a).

- Si la latitud es de -20° , (figura 38b) el observador esta en la zona intertropical y se puede ver la Luna levantarse sonriendo como una "U", posiblemente ligeramente inclinada. La Luna se mueve en una trayectoria más perpendicular al horizonte que en el ejemplo anterior (figura 32b). La forma de "U" no cambia dependiendo del mes.

- Si es de latitud -90° , el observador esta en el Polo Sur, y podrá, de acuerdo a la fecha:

- Ver la Luna como una "D" que se mueve una trayectoria paralela al horizonte.
- No lo ve, ya que su trayectoria está por debajo del horizonte.

- A latitud 0° , al igual que en el simulador del hemisferio norte, el observador esta en el ecuador, y nosotros podemos ver la sonrisa de la Luna como una "U". La Luna se eleva perpendicular al horizonte y ella se esconderá (hacia el mediodía) en forma de "U" y reaparecerá: '∩' ...

Para otros observadores que viven en latitudes intermedias, la fase de la Luna se eleva y se oculta en una posición intermedia entre la "D" y la "U" es más o menos inclinada de acuerdo con la latitud del lugar de observación.

Estos comentarios pueden establecerse de una manera similar para la Luna en forma de "C", recordando corregir la fecha (en este caso, deben restar 3 meses) al pensar en la posición del Sol.

"Agradecimiento: Los autores desean agradecer a Joseph Snider su instrumento solar producido en 1992 que le inspiró para producir los otros simuladores".

.....

Bibliografía

- Ros, R.M., "De l'intérieur et de l'extérieur", Les Cahiers Clairaut, 95, 1, 5, France, 2001.
- Ros, R.M., "Sunrise and sunset positions change every day", Proceedings of 6th EAAE International Summer School, 177, 188, Barcelona, 2002.
- Ros, R.M., "Two steps in the stars' movements: a demonstrator and a local model of the celestial sphere", Proceedings of 5th EAAE International Summer School, 181, 198, Barcelona, 2001.
- Snider, J.L., The Universe at Your Fingertips, Frankoi, A. Ed., Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, 1995.
- Warland, W., "Solving Problems with Solar Motion Demonstrator", Proceedings of 4th EAAE International Summer School, 117, 130, Barcelona, 2000.

Sistema Tierra-Luna-Sol: Fases y eclipses

Rosa M. Ros

International Astronomical Union, Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España)

Resumen

Se presentan algunos modelos sobre las fases de la Luna y los eclipses de Sol y de Luna. También se utilizan los eclipses para determinar distancias y diámetros en el sistema Tierra-Luna-Sol.

Finalmente se explica el origen de las mareas.

Objetivos

- Comprender por qué la Luna tiene fases.
- Comprender la causa de los eclipses de Luna.
- Comprender el motivo de los eclipses de Sol.
- Determinar distancias y diámetros del sistema Tierra-Luna-Sol
- Comprender el origen de las mareas.

Posiciones relativas

El término "eclipse" se utiliza para fenómenos muy diferentes, sin embargo en todos los casos este fenómeno tiene lugar cuando la posición relativa de la Tierra y la Luna (cuerpos opacos) interrumpe el paso de la luz solar.

Un eclipse de Sol sucede cuando el Sol es cubierto por la Luna que se sitúa entre el Sol y nuestro planeta. Este tipo de eclipses siempre tienen lugar en Luna nueva (figura 1).

Los eclipses de Luna se producen cuando la Luna pasa a través de la sombra de la Tierra. Es decir, cuando la Luna está en el lugar opuesto del Sol, por lo tanto, los eclipses lunares se dan siempre en la fase de Luna llena (figura 1).

La Tierra y la Luna se mueven siguiendo órbitas elípticas que no están en el mismo plano. La órbita de la Luna está inclinada 5° respecto al plano de la eclíptica (plano de la órbita de la Tierra entorno al Sol). Ambos planos se intersectan en una recta llamada la Línea de los Nodos. Los eclipses tienen lugar cuando la Luna está próxima a la Línea de los

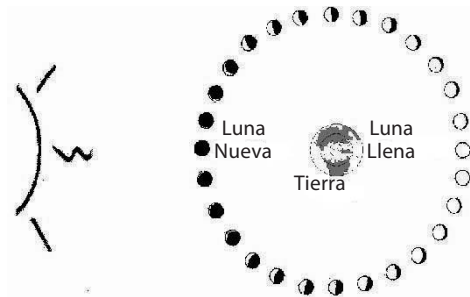


Fig.1: Los eclipses de Sol tienen lugar cuando la Luna está situada entre el Sol y la Tierra (Luna nueva). Los eclipses de Luna suceden cuando la Luna cruza el cono de sombra de la Tierra, entonces la Tierra está situada entre el Sol y la Luna (Luna llena).

Nodos. Si ambos planos no formaran un ángulo, los eclipses serían mucho más frecuentes.

Modelo con máscaras

Modelo de la cara oculta

La Luna tiene un movimiento de rotación y otro de traslación alrededor de la Tierra que duran aproximadamente lo mismo, esto es unas cuatro semanas. Por este motivo desde la Tierra solo podemos ver aproximadamente la mitad de la superficie lunar.

Vamos a visualizarlo con un sencillo modelo. Comenzamos situando un voluntario que hace de Tierra y un voluntario que actúa como la Luna. Le pondremos al voluntario que representa la Luna una máscara blanca redonda recortando un trozo de cartulina. Situamos el voluntario que hace de Luna de cara a la Tierra antes de comenzar a moverse. Hacemos avanzar Luna avanza 90° en su órbita de traslación entorno a la Tierra, pero sin rotación. Preguntaremos a la Tierra si lo ve de cara y nos dirá que solo le ve de perfil y ve la oreja centrada en medio de la cabeza. Pero si al luna gira también los mismos 90° en rotación sobre sí misma, entonces la Tierra le verá la misma cara de siempre y ha transcurrido solo una semana. Repetimos el proceso de nuevo. Se traslada de nuevo la Luna 90° sin rotación y sucede igual



Fig. 2: Modelo de la Tierra y la Luna con voluntarios (para explicar las fases y la cara visible de la Luna).

que antes, la Tierra no la ve de cara, pero si gira de nuevo otros 90° en rotación ya le ve de nuevo la cara con su máscara y ha transcurrido la segunda semana. Y así sucesivamente hasta dar una vuelta completa que corresponde a las cuatro semanas. Está claro que la Luna siempre muestras la misma cara después de cuatro semanas y la parte de atrás de la cabeza del voluntario lunar no se ve nunca.

Modelo para las fases

Para explicar las fases de la Luna lo mejor es usar un modelo con una linterna o con un retroproyector (que servirá de Sol) y un mínimo de 5 voluntarios. Uno de ellos estará situado en el centro representando la Tierra y los otros 4 se situaran alrededor del mismo de forma equidistante para simular las diferentes fases de la Luna (figura 2). Para que sea más vistoso seguiremos con la máscara blanca que servirá para visualizar la Luna. Colocaremos la linterna encendida detrás de uno de los voluntarios que simula la Luna (algo por encima para que no tape la luz) y comenzaremos por visualizar las 4 fases (vistas desde la Tierra que está en el centro). Es muy fácil descubrir que a veces se ve la máscara completa, a veces sólo un cuarto y otras veces no se ve nada porque deslumbra la luz de la linterna (es decir, del Sol).

Colocaremos la linterna encendida detrás de uno de los voluntarios que simula la Luna (algo por encima para que no tape la luz) y comenzaremos por visualizar las fases, haciendo hincapié que siempre se considera la observación realizada desde el punto de vista de la Tierra (que está en el centro). Es muy fácil descubrir que a veces se ve la máscara completamente iluminada, a veces sólo un cuarto, (el derecho o el izquierdo) y otras veces no se ve nada iluminada porque deslumbra la luz de la linterna (es decir, del Sol).

Modelo Tierra-Luna

Comprender de forma clara las fases de la Luna y la geometría que encierra el fenómeno de los eclipses de Sol y de Luna no es sencillo. Para ello, se propone un sencillo modelo que ayuda a hacer más inteligibles todos estos procesos.

Basta clavar dos clavos (de unos 3 ó 4 cm) a un listón de madera de 125 cm. Los clavos estarán separados 120 cm y en cada uno fijaremos dos bolas de 4 y 1 cm (figura 3).

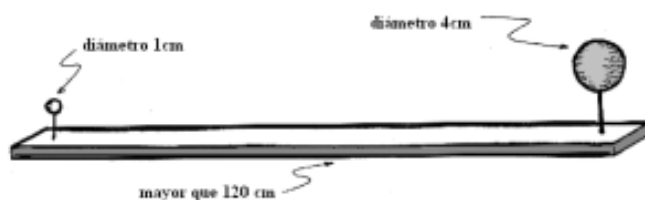


Fig. 3: Modelo con la Tierra y la Luna

Es importante respetar estas medidas porque son las que corresponden a un modelo a escala del sistema Tierra-Luna respetando las proporciones de distancias y diámetros.

Diámetro Tierra	12.800 Km	4 cm
Diámetro Luna	3.500 Km	1 cm
Distancia Tierra-Luna	384.000 Km	120 cm
Diámetro Sol	1.400.000 Km	440 cm = 4,4 m
Distancia Tierra-Sol	150.000.000 Km	4.700 cm = 0,47 km

Tabla 1: Distancias y diámetros del sistema Tierra-Luna-Sol

Reproducción de las fases de la Luna

En un lugar soleado, cuando sea visible la Luna, se apunta con el listón dirigiendo la pelotita de la Luna hacia ésta (figura 4). El observador debe situarse detrás de la bola de la Tierra. La esfera de la Luna se ve del mismo tamaño aparente que la Luna y con la misma fase que la real.

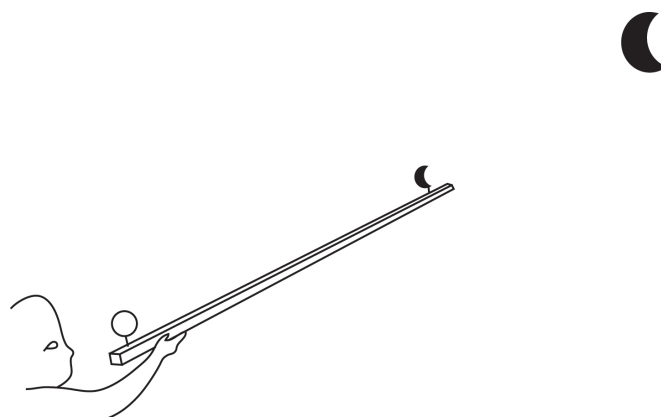


Fig. 4: Usando el modelo en el patio de la escuela.

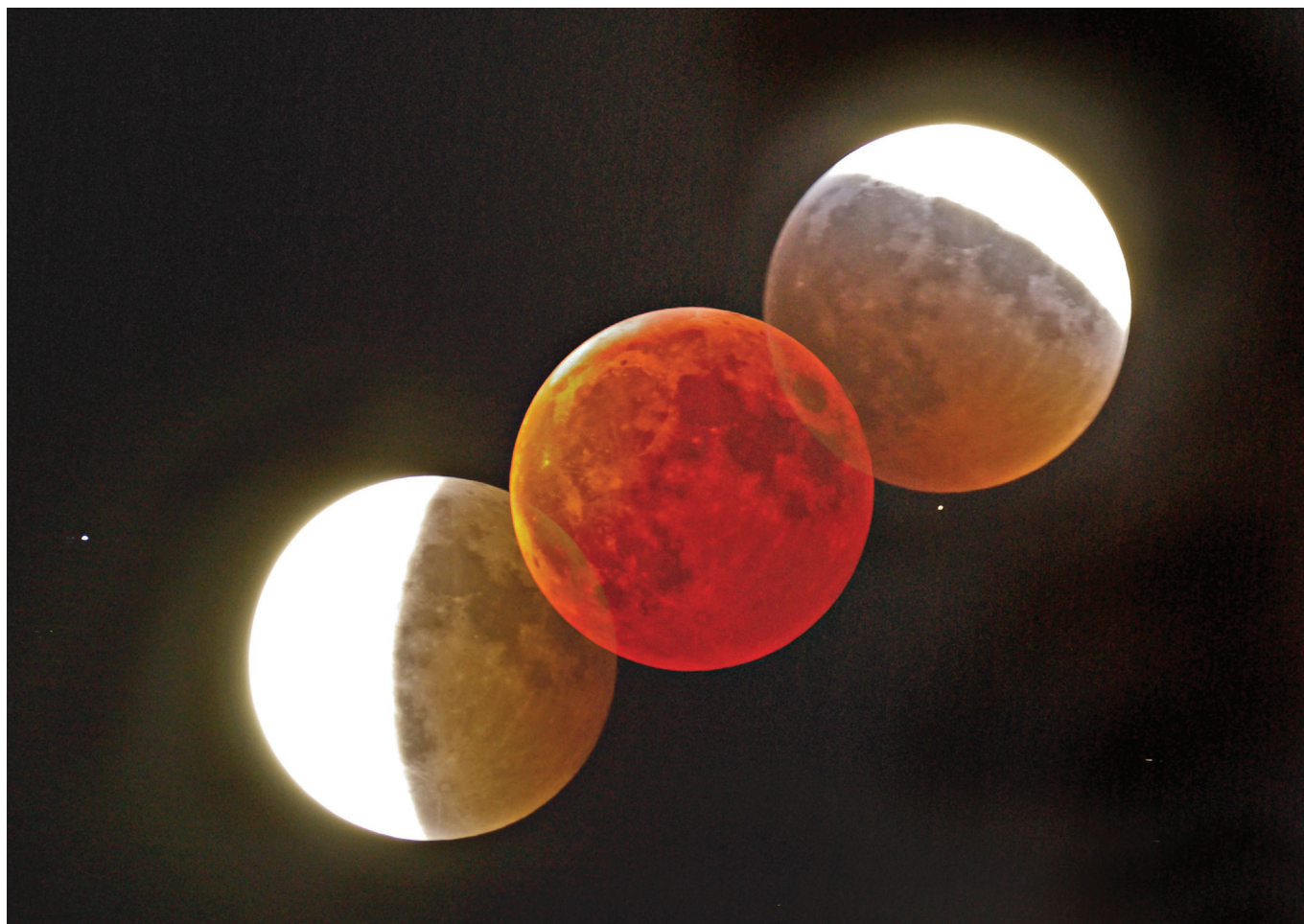


Fig. 6: Composición fotográfica de un eclipse de Luna. Nuestro satélite cruzando el cono de sombra producido por la Tierra.

Variando la orientación del listón se consiguen reproducir las diferentes fases de la Luna al variar la iluminación que recibe del Sol. Hay que mover la Luna para conseguir la secuencia de todas las fases.

Esta actividad es mejor llevarla a cabo en el patio, pero si está nublado también se puede hacer con un retroproyector o una linterna.

Reproducción de los eclipses de Luna

Se sujeta el listón de manera que la pelotita de la Tierra esté dirigida hacia el Sol (es mejor usar un retroproyector para evitar mirar al Sol) y se

hace entrar la Luna (figura 5) dentro de la sombra de la Tierra, que es mucho mayor que la Luna: así se visualiza fácilmente un eclipse de Luna.

Reproducción de los eclipses de Sol

Se toma el listón de forma que la Luna esté dirigida hacia el Sol (es mejor usar el retroproyector o la linterna) y se hace que la sombra de la Luna se proyecte sobre la esfera terrestre. De esta forma se consigue visualizar un eclipse de Sol. Se puede ver que la sombra de la Luna da lugar a una pequeña mancha sobre una región de la Tierra (figura 8).



Fig. 5: Simulación de un eclipse de Luna.



Fig. 7: Simulación de un eclipse solar.

No es fácil conseguir esta situación porque la inclinación del listón debe ser muy ajustada (esta es la causa de que haya menos eclipses de Sol que de Luna).



Fig. 8: Detalle de la figura previa 5a.



Fig. 9: Fotografía tomada desde la MIR del eclipse de Sol de 1999 sobre una zona de la superficie terrestre.

Observaciones

- Sólo puede tener lugar un eclipse de Luna cuando es Luna llena y un eclipse de Sol cuando hay Luna nueva.
- Un eclipse solar sólo se ve en una zona reducida de la Tierra.
- Es muy difícil que la Tierra y la Luna estén “bien alineadas” para que se produzca un eclipse cada vez que sea Luna nueva o Luna llena.

Modelo Sol-Luna

Con el fin de visualizar el sistema Sol-Tierra-Luna haciendo especial hincapié en las distancias, vamos a considerar un nuevo modelo, teniendo en cuenta el punto de vista terrestre del Sol y de la Luna. En este caso vamos a invitar a los estudiantes a dibujar y a pintar un gran Sol de 220

Diámetro Tierra	12.800 Km	2,1 cm
Diámetro Luna	3.500 Km	0,6 cm
Distancia Tierra-Luna	384.000 Km	60 cm
Diámetro Sol	1.400.000 Km	220 cm
Distancia Tierra-Sol	150.000.000 Km	235 cm

Tabla 2: Distancias y diámetros del sistema Tierra-Luna-Sol

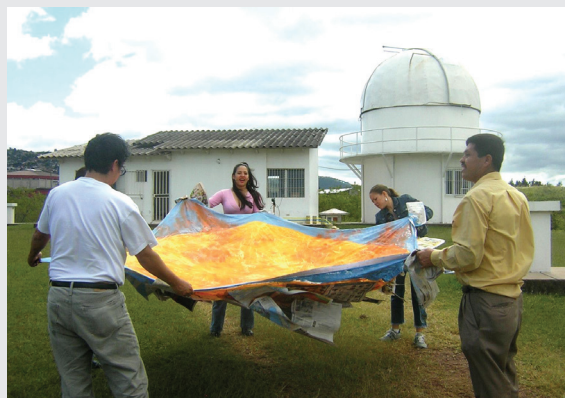


Fig. 10: Modelo de Sol



Fig. 11: Mirando el Sol a través del agujero de la Luna.

cm de diámetro (más de 2 metros de diámetro) en una sabana y vamos a demostrar que pueden cubrir este gran Sol con una pequeña Luna de 0,6 cm de diámetro (menos de 1 cm de diámetro). Se puede sustituir la bola Luna por un agujero en una tabla de madera para que sea más manejable.

Es importante la utilización de las dimensiones mencionadas anteriormente para mantener las proporciones de los diámetros y las distancias (tabla 2). En este modelo, el Sol se sitúa a 235 metros de la Luna y el observador estará a 60 cm desde la Luna. Los estudiantes se sienten muy sorprendidos de que puedan cubrir el gran Sol con esta pequeña luna. Realmente esta relación de un Sol 400 veces mayor que la Luna no es fácil de imaginar. Es bueno por lo tanto para mostrarlo con un ejemplo para entender la magnitud de las distancias y el tamaño real en el Universo. Todos estos ejercicios y actividades les ayudan (y puede que a nosotros también) para comprender cuáles son las relaciones espaciales entre los cuerpos celestes durante un eclipse solar. Este método es mucho mejor que leer una serie de números en un libro.

Determinación del diámetro del Sol

Se puede medir el diámetro del Sol de diversas formas. A continuación presentaremos un sencillo método usando una cámara oscura. Se puede hacer con una caja de zapatos o con un tubo de cartón que sirve de eje central para el papel de aluminio o transparente de la cocina, pero si se hace con un tubo de mayores dimensiones se consigue obtener más precisión.

1. Tapamos uno de los extremos con papel vegetal milimetrado semitransparente y el otro extremo con un papel recio, donde haremos un agujero con un alfiler fino (figuras 12 y 13)

2. Hay que dirigir el extremo con el pequeño agujero hacia el Sol y mirar por el otro extremo donde hay el papel milimetrado. Medimos el diámetro d de la imagen del Sol en este papel milimetrado.

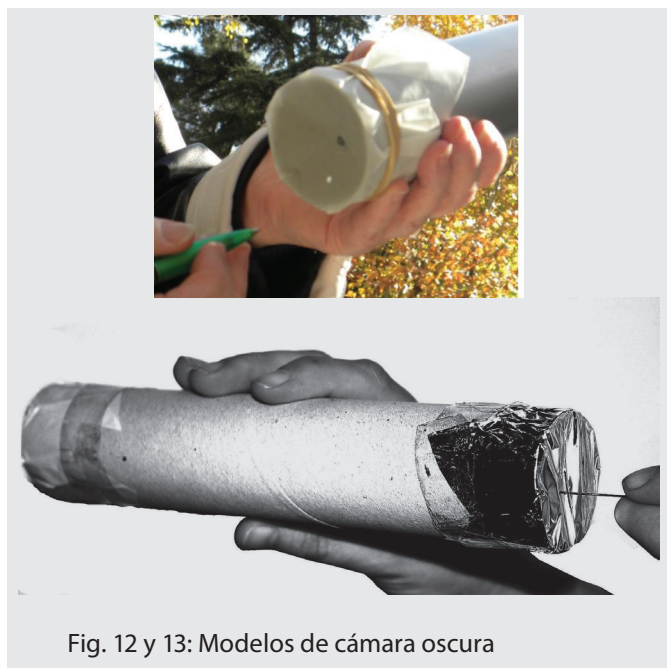


Fig. 12 y 13: Modelos de cámara oscura

Para calcular el diámetro del Sol, basta considerar la figura 14, donde aparecen dos triángulos semejantes

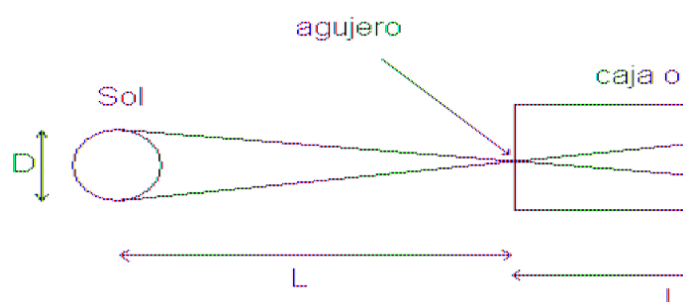


Fig. 14: Problema geométrico subyacente

Donde podemos establecer la relación:

$$\frac{D}{L} = \frac{d}{l}$$

De donde se puede despejar el diámetro del Sol, D :

$$D = \frac{d \cdot L}{l}$$

Conocida la distancia del Sol a la Tierra $L = 150.000.000$ km. podemos calcular, conocida la longitud del tubo l y el diámetro d de la imagen del Sol sobre la pantalla de papel milimetrado semitransparente, el diámetro D del Sol. (Recordad que el diámetro solar es de 1392000 km).

Se puede repetir el ejercicio con la Luna llena sabiendo que esta se encuentra a unos 400.000 km. de la Tierra.

Tamaños y Distancias en el sistema Tierra-Luna-Sol

Aristarco (310-230 a.C) dedujo algunas proporciones entre las distancias y los radios del sistema Tierra-Luna-Sol. Calculó el radio del Sol y de la Luna, la distancia desde la Tierra al Sol y la

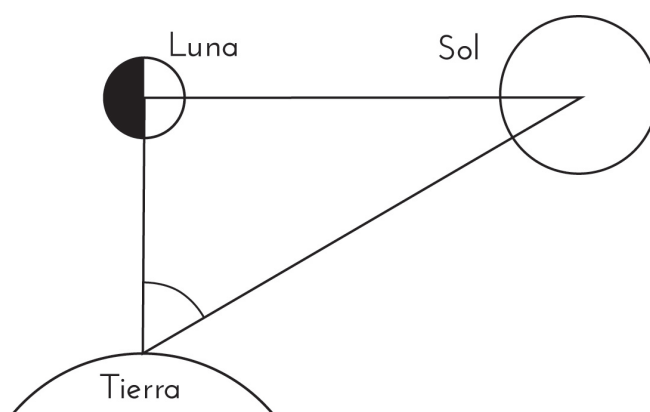


Fig.15: Posición relativa de la Luna en el cuarto

distancia de la Tierra a la Luna en relación al radio de la Tierra. Algunos años después Eratóstenes (280-192 a.C) determinó el radio de nuestro planeta y fue posible calcular todas las distancias y radios del sistema Tierra-Luna-Sol.

La propuesta de esta actividad consiste en repetir con estudiantes ambos experimentos. La idea es repetir el proceso matemático diseñado por Aristarco y Eratóstenes a la vez que, en la medida de lo posible, repetir las observaciones.

El experimento de Aristarco, de nuevo

Aristarco determinó que el ángulo bajo el que se observa desde la Tierra la distancia Sol-Luna cuando ésta en el instante del cuarto era de $\alpha = 87^\circ$.

En la actualidad, se sabe que cometió un error, posiblemente debido a que le resultó muy difícil determinar el preciso instante del cuarto de fase. De

hecho este ángulo es de $\alpha = 89^\circ 51'$, pero el proceso usado por Aristarco es perfectamente correcto. En la figura 15, si se usa la definición de coseno, se puede deducir que,

$$\cos \alpha = \frac{TL}{TS}$$

donde TS es la distancia desde la Tierra al Sol, y TL es la distancia de la Tierra a la Luna. Entonces aproximadamente,

$$TS = 400 TL$$

(aunque Aristarco dedujo $TS = 19 TL$).

Relación entre el radio de la Luna y del Sol

La relación entre el diámetro de la Luna y del Sol debe ser similar a la fórmula previamente obtenida, porque desde la Tierra se observan ambos diámetros iguales a 0.5° . Por lo tanto ambos radios verifican,

$$R_s = 400 R_L$$

Relación entre la distancia de la Tierra a la Luna y el radio lunar o entre la distancia de la Tierra al Sol y el radio solar

Dado que el diámetro observado de la Luna es de 0.5° , con 720 veces este diámetro es posible recorrer la trayectoria circular de la Luna entorno a la Tierra. La longitud de este recorrido es 2π veces la distancia Tierra-Luna, es decir $2 R_L 720 = 2\pi TL$, despejando,

$$TL = \frac{720 R_L}{\pi}$$

y por un razonamiento similar: $TS = \frac{720 R_s}{\pi}$

Esta relación es entre las distancias a la Tierra, el radio lunar, el radio solar y el radio terrestre.

Relación es entre las distancias a la Tierra del Sol y la Luna, el radio lunar, el radio solar y el radio terrestre.

Durante un eclipse de Luna, Aristarco observó que el tiempo necesario para que la Luna cruce el cono de sombra terrestre era el doble del tiempo necesario para que la superficie de la Luna fuera cubierta (figura 16). Por lo tanto, dedujo que la sombra del diámetro de la Tierra era doble que el diámetro de la Luna, esto es, la relación de ambos diámetros o radios era de 2:1. Realmente se sabe que este valor es de 2.6:1.

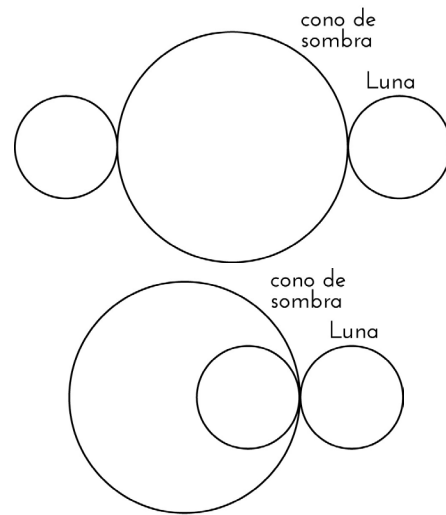


Fig. 16a: Midiendo el cono de sombra.

Fig. 16b: Midiendo el diámetro de la Luna

Resumen final

Con este resultado se puede establecer el dibujo de la figura 17

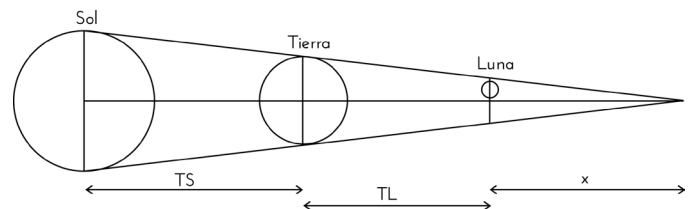


Fig. 17: Cono de sombra y posiciones relativas del sistema Tierra-Luna-Sol.

y formular la siguiente proporción, tomando x como una variable auxiliar que después se eliminara.

$$\frac{x}{2.6 R_L} = \frac{x+TL}{R_T} = \frac{x+TL+TS}{R_s}$$

Introduciendo en esta expresión las relaciones $TS = 400 TL$ y $R_s = 400 R_L$, se puede eliminar x y simplificando se obtiene,

$$R_L = \frac{401}{1440} R_T$$

que permite expresar todas las dimensiones mencionadas con anterioridad en función del radio de la Tierra, así

$$R_s = \frac{2005}{18} R_T \quad TS = \frac{80200}{\pi} R_T \quad TL = \frac{401}{2\pi} R_T$$

Donde sólo hay que sustituir el radio de nuestro planeta para obtener todas las distancias y radios del sistema Tierra-Luna-Sol.

Medidas con los estudiantes

Es una buena idea repetir las medidas realizadas por Aristarco con los estudiantes. En particular, primero hay que calcular el ángulo entre el Sol y la Luna en el cuarto. Para realizar esta medida sólo es necesario disponer de un teodolito y saber el exacto instante del cuarto. Así se verificará si este ángulo mide $\alpha = 87^\circ$ ó $\alpha = 89^\circ 51'$ (es esta una medida realmente difícil de obtener).

En segundo lugar, durante un eclipse de Luna, usando un cronómetro, es posible calcular la relación entre los tiempos siguientes: “el primer y el último contacto de la Luna con el cono de sombra terrestre”, es decir, medir el diámetro del cono de sombra de la Tierra (figura 16a) y “el tiempo necesario en cubrir la superficie lunar”, esto es la medida del diámetro de la Luna (figura 16b). Finalmente es posible verificar si la relación entre ambos tiempos es 2:1 ó es de 2.6:1, o les sale diferente.

El objetivo más importante de esta actividad, no es el resultado obtenido para cada radio o distancia. Lo más importante es hacer notar a los estudiantes que, si ellos usan sus conocimientos e inteligencia, pueden obtener interesantes resultados disponiendo de pocos recursos. En este caso, el ingenio de Aristarco fue muy importante para conseguir obtener alguna idea acerca del tamaño del sistema Tierra-Luna-Sol.

Es también una buena idea medir con los estudiantes el radio de la Tierra siguiendo el proceso usado por Eratóstenes. Aunque el experimento de Eratóstenes es muy conocido, presentamos aquí una versión reducida del mismo de cara a completar la experiencia anterior.

El experimento de Eratóstenes, de nuevo

Eratóstenes era el director de la Biblioteca de Alejandria, y en uno de los textos de la misma leyo que en la ciudad de Syena (actualmente Asuan) el día del solsticio de verano, en el medio día solar, el Sol se veía reflejado en el fondo de un pozo, o lo que es lo mismo los palos no producían sombra en ese momento. Eratóstenes, observó que ese mismo día a la misma hora un palo producía sombra en Alejandria. De ello dedujo que la superficie de la Tierra no podría ser plana, sino que debería ser una esfera (figura 18a y 18b).

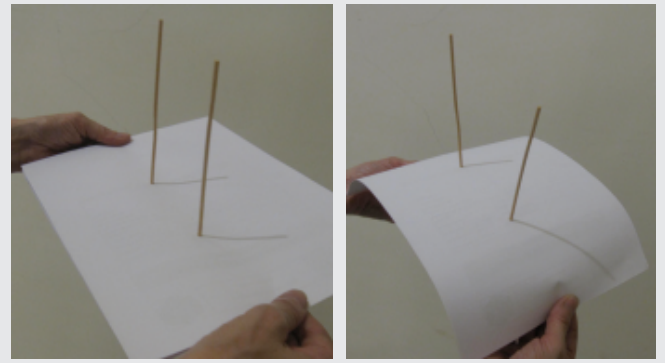


Fig. 18a y 18b: En una superficie plana los dos palillos producen la misma sombra, pero si la superficie es curvada no.

Consideremos dos estacas introducidas perpendicularmente en el suelo, en dos ciudades de la superficie terrestre sobre el mismo meridiano. Las estacas deben estar apuntando hacia el centro de la Tierra. Normalmente es mejor usar una plomada donde se marca un punto del hilo para poder medir las longitudes. Se debe medir la longitud de la plomada desde el suelo hasta esa marca, y la longitud de su sombra desde la base de la plomada hasta la sombra de la marca.

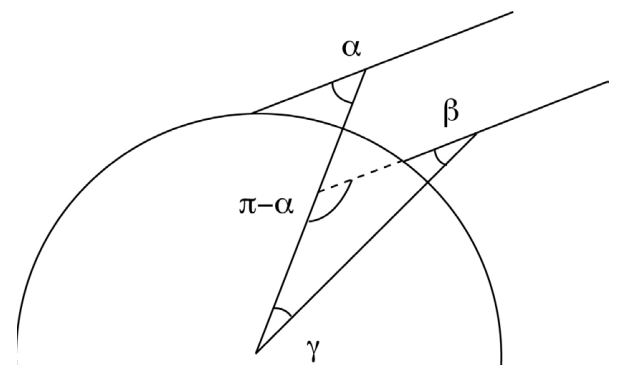


Fig. 19: Situación de plomadas y ángulos en el experimento de Eratóstenes.

Se considera que los rayos solares son paralelos. Esos rayos solares producen dos sombras, una para cada plomada. Se miden las longitudes de la plomada y su sombra y usando la definición de tangente, se obtienen los ángulos α y β (figura 19). El ángulo central γ puede calcularse imponiendo que la suma de los ángulos de un triángulo es igual a π radianes. Entonces $\pi = \pi - \alpha + \beta + \gamma$ y simplificando,

$$\gamma = \alpha - \beta$$

donde α y β se han obtenido a partir de medir la plomada y su sombra.

Finalmente estableciendo una proporcionalidad entre el ángulo γ , la longitud de su arco d (determinado por la distancia sobre el meridiano entre las dos ciudades), y 2π radianes del círculo meridiano y su longitud $2\pi R_T$, es decir,

$$\frac{2\pi R_T}{2\pi} = \frac{d}{\gamma}$$

entonces se deduce que: $R_T = \frac{d}{\gamma}$

donde γ se ha obtenido a partir de la observación, en radianes, y d es la distancia en km entre ambas ciudades. Se puede hallar d a partir de un buen mapa.

En el caso de Eratostenes el ángulo β era nulo y sencillamente $\gamma = \alpha$ y como la distancia desde Alejandria a Syena era conocida como ruta de caravanas, pudo deducir el radio de la Tierra dando un resultado muy correcto.

También hay que mencionar que el objetivo de esta actividad no es la precisión de los resultados. Solo se desea que los estudiantes descubran que pensando y usando todas las posibilidades que puedan imaginar son capaces de obtener resultados sorprendentes.

Mareas

Las mareas son el ascenso y descenso del nivel del mar causado por los efectos combinados de la rotación de la Tierra y las fuerzas gravitacionales ejercidas por la Luna y el Sol. La forma del fondo y de la orilla en la zona costera también influye en menor medida. Las mareas se producen con un período de aproximadamente 12 horas y media.

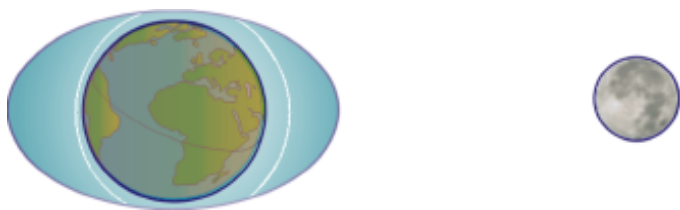


Fig. 20: El efecto de las mareas

Las mareas se deben principalmente a la atracción entre la Luna y la Tierra.

Del lado de la Tierra que está de frente a la Luna y en el lado opuesto ocurren las mareas altas (figura 20). En los puntos intermedios se dan las mareas bajas.

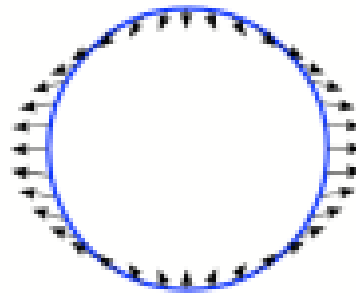


Fig. 21: Efecto, sobre el agua, de la aceleración diferenciada de la Tierra en diferentes áreas del océano.

El fenómeno de las mareas ya era conocido en la antigüedad, pero su explicación sólo fue posible después de conocerse la Ley de Newton de la Gravitación Universal (1687).

$$F_g = G \frac{m_T \cdot m_L}{d^2}$$

La Luna ejerce una fuerza gravitacional sobre la Tierra. Cuando hay una fuerza gravitacional se puede considerar que existe una aceleración gravitacional que, de acuerdo con la segunda ley de Newton ($F = m \cdot a$). Así la aceleración de la Luna sobre la Tierra viene dada por

$$a_g = G \frac{m_L}{d^2}$$

donde m_L es la masa de la Luna y d es la distancia de la Luna a un punto de la Tierra.

La parte sólida de la Tierra es un cuerpo rígido y, por eso, se puede considerar toda la aceleración sobre esta parte sólida aplicada en el Centro de la Tierra. Sin embargo, el agua es líquida y sufre una aceleración diferenciada que depende de la distancia a la Luna. Así la aceleración del lado más próximo a la Luna es mayor que la del lado más alejado. En consecuencia, la superficie del océano va a generar un elipsoide (figura 21).

Ese elipsoide queda siempre con la zona más alargada hacia la Luna (figura 20) y la Tierra va a girar por debajo. Así cada punto de la Tierra tendrá 2 veces al día una marea alta seguida de una marea baja. Realmente el período entre mareas es un poco superior a 12 horas y la razón

es que la Luna gira respecto a la Tierra con un período sinódico de cerca de 29,5 días. Lo que significa que recorre 360° en 29,5 días, así la Luna va a avanzar en el cielo cerca de $12,2^\circ$ cada día o sea $6,6^\circ$ cada 12 horas. Como en cada hora la Tierra gira sobre sí misma cerca de 15° , $6,6^\circ$ equivalen a 24 minutos, por lo que cada ciclo de marea es de 12 horas y 24 minutos. Como el intervalo de tiempo entre marea alta y marea baja es la mitad, el tiempo que comprendido desde la marea alta hasta la marea baja o de la marea baja hasta la marea alta será de unas 6h 12 min.

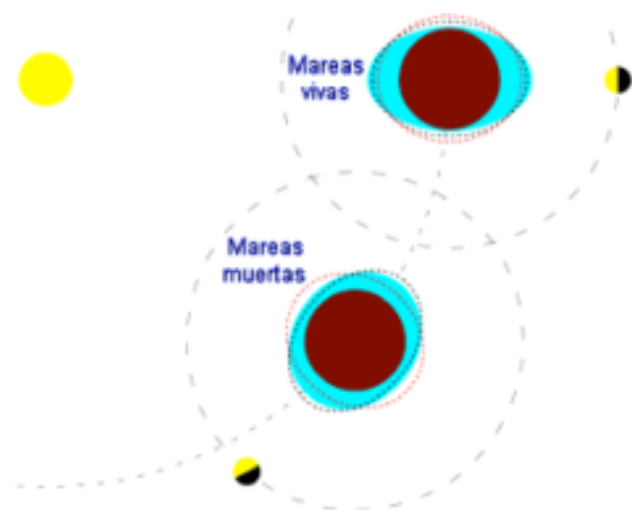


Fig 22: Mareas vivas y mareas muertas.

La Luna es la que mas influye en las mareas debido a su proximidad. Pero el Sol también influye en las mareas. Cuando la Luna y el Sol están en conjunción (Luna nueva) o en oposición (Luna llena) se dan las mareas vivas. Cuando la Luna y el Sol ejercen atracciones gravitacionales perpendiculares (Cuarto creciente y Cuarto menguante) se dan las mareas muertas (figura 22).

.....

Bibliografía

- Broman, L., Estalella, R., Ros, R.M., "Experimentos de Astronomía. 27 pasos hacia el Universo", Editorial Alambra, Madrid, 1988.
- Broman, L., Estalella, R., Ros, R.M., "Experimentos de Astronomía", Editorial Alambra, México, 1997.
- Fucili, L., García, B., Casali, G., "A scale model to study solar eclipses", Proceedings of 3rd EAAE Summer School, 107, 109, Barcelona, 1999
- Lanciano, N., Strumenti per i giardino del cielo, Edizioni junior, Spaggiari Eds, Roma, 2016.
- Redd, M. P. M., Affholder, M, "Descriptive physi-

cal oceanography: State of the Art", Taylor and Francis, 249, 2001.

- Ros, R.M., "Lunar eclipses: Viewing and Calculating Activities", Proceedings of 9th EAAE International Summer School, 135, 149, Barcelona, 2005.

Maletín del joven astrónomo

Rosa M. Ros

International Astronomical Union, Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España)

Resumen

Para promover la observación es necesario que los alumnos dispongan de un conjunto de sencillos instrumentos. Se propone que ellos mismos realicen algunos de ellos y después los empleen en la observación del cielo desde el propio centro educativo.

Es muy importante que los alumnos entiendan de forma básica cómo se han introducido varios instrumentos a lo largo de los siglos. Como han nacido y se han hecho necesarios. Hacen falta conocimientos astronómicos, gran habilidad para construirlos y destreza para tomar las medidas o hacer las lecturas correspondientes de las observaciones. Estos requisitos no es fácil desarrollarlos si tratamos de hacer prácticas con los alumnos; por ese motivo se proponen aquí instrumentos muy sencillos.

Objetivos

- Comprender la importancia de realizar observaciones cuidadosas.
- Comprender el uso de diversos instrumentos gracias a la construcción por parte de los propios alumnos.

La Observación

Se puede adquirir cierta práctica en la medida del tiempo y de posiciones de los cuerpos celestes con artefactos preparados "ad hoc". Aquí damos alguna información con el fin de hacernos con una colección de artefactos, metidos todos juntos en una maleta: el equipo indispensable para las observaciones. La maleta y el contenido son hechos en general con cartón usando pegamento, tijeras, etc. El tópico puede ofrecer la posibilidad de investigar otros muchos instrumentos antiguos y modernos.

La habilidad artística y fantasiosa de los alumnos permitirá obtener unas maletas muy personales.

Esta actividad puede modificarse fácilmente y adaptarla a los alumnos dependiendo de la edad de éstos, con instrumentos más o menos sofisticados.

En particular, esta maleta contiene:

- Una regla para medir ángulos
- Un cuadrante simplificado
- Un goniómetro horizontal
- Un planisferio
- Un espectroscopio
- Un mapa de la Luna
- Un reloj ecuatorial

Nosotros proponemos una maleta con instrumentos muy sencillos. La pequeña maleta puede llevarse fácilmente a la escuela o en el tiempo libre, siempre dispuesta para ser usada. Es muy importante que no sea muy grande ni frágil (especialmente si ha de ser utilizada por estudiantes muy jóvenes). Insistimos en que el esmero en las medidas no es el fin de esta actividad.

Contenidos

Nosotros obviamente solo podemos simular esto en un patio durante el verano. La idea es adquirir práctica con los utensilios que ahora vamos a hacer aquí.

En primer lugar necesitamos una caja de cartón como las que recibes por correo con un gran libro dentro (esta será la maleta). Es necesario únicamente colocarle un asa en el lado estrecho y que el lado ancho pueda abrirse. Dentro de la caja, colocaremos los siguientes instrumentos:

- Una **regla para medir ángulos** que puede usarse para darnos la distancia angular entre dos estrellas de la misma constelación. Es muy sencilla de usar si no queremos introducir las coordenadas.
- Un **cuadrante simplificado** que puede usarse para obtener la altura de las estrellas. Cuando los alumnos ven un objeto por el visor la cuerda indica la posición angular referida a su horizonte.
- Un **goniómetro horizontal** simple que puede usarse para determinar el acimut de las estrellas. Obviamente se necesita usar una brújula para orientar el instrumento en la dirección Norte-Sur.

- Un **planisferio** con las constelaciones del cielo fotocopiadas muy claras en un disco de papel blanco y una bolsa de cartón con el “agujero” de la latitud para meter el disco del cielo dentro. Girando el disco se encuentra la fecha y la hora de observación para reconocer las constelaciones más importantes para la latitud del “agujero” que usemos.

- Un **espectroscopio** para descomponer la luz solar en los siete colores que la componen.

- Un **mapa de la Luna** con los nombres de los mares y algunos cráteres que sean fácilmente reconocibles con unos prismáticos.

- Un **reloj ecuatorial** es uno de los relojes de Sol más sencillos de construir y también son los más fáciles de orientar. Usaremos el reloj ecuatorial diseñado en el taller del horizonte local y relojes que forma parte de este mismo curso.

- Una **linterna** (de luz roja), para iluminar los mapas antes de mirar al cielo real. La luz estropea las observaciones. Si los alumnos llevan una linterna en la maleta, es necesario que pongan un “papel de celofán” sobre la lámpara fijado con celo. Un grupo de alumnos con linternas que no sean de luz roja pueden producir mucha polución lumínica dificultando la observación.

- Una **brújula** para orientar los diferentes instrumentos.

Y naturalmente, todos los accesorios que necesita todo alumno: libreta de notas, lápiz, un reloj y, si se dispone, de una cámara fotográfica.

Siguiendo las instrucciones y los dibujos podemos hacernos nuestros instrumentos de una forma muy sencilla y usarlos al aire libre. Durante el día mediremos, por ejemplo, con el cuadrante la posición (altura) de la copa de un árbol, una colina, etc. Por la noche, podemos medir la posición de dos estrellas distintas o de la Luna con el fin de entender el ciclo periódico de sus fases. Invitamos a los alumnos a tomar los datos.

Para abordar por primera vez una noche de observación es mejor utilizar mapas sencillos preparados de antemano (alguna cartulina planetario sujetado con un alfiler!) y el planisferio para familiarizarse con las constelaciones más importantes. Naturalmente los mapas astronómicos son muy precisos pero la experiencia de los profesores sugiere que en ocasiones no son fáciles de usar sin ayuda por los alumnos.

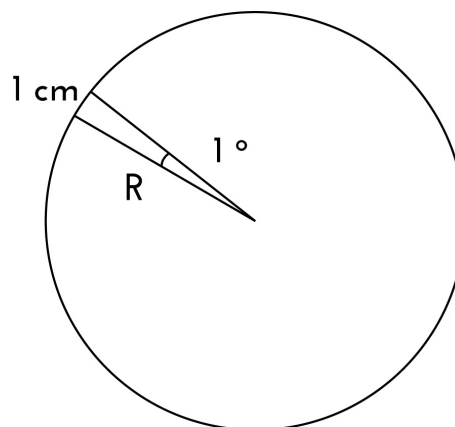


Fig. 1: El radio R con el fin de obtener un instrumento que 1° sea equivalente a 1 cm.

Una regla para medir ángulos

Considerando una simple proporción podemos construir un instrumento básico para medir ángulos en cualquier situación. Nuestro principal objetivo es contestar la siguiente pregunta: “¿Cuál es la distancia (radio R) que necesito con el fin de obtener un artificio que 1° sea equivalente a 1 cm?”.

En la figura 1 consideramos la relación entre la circunferencia de longitud $2\pi R$ en centímetros, para 360° , con 1 cm para 1° :

$$\frac{2\pi R \text{ cm}}{360^\circ} = \frac{1 \text{ cm}}{1^\circ}$$

Por lo tanto,

$$R = 180 / \pi = 57 \text{ cm}$$

Para construir el instrumento

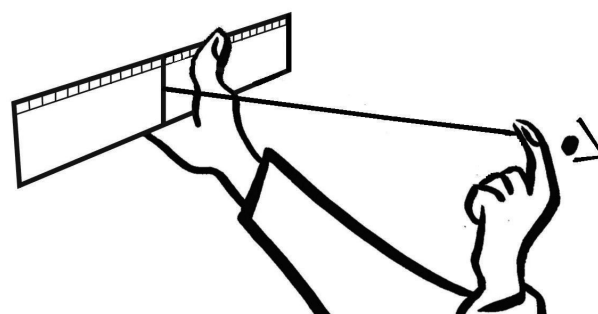


Fig. 2: Usando la herramienta (una regla y un trozo de cuerda de 57 cm de longitud), se pueden medir ángulos con la equivalencia “1 cm = 1° ”.

Cogemos una regla, donde fijamos una cuerda de 57 cm de longitud. Es muy importante que la cuerda no sea extensible.

Cómo se usa:

- Miramos con el final de la cuerda casi tocando nuestro ojo “en la mejilla, debajo del ojo”

• Podemos medir usando la regla y la equivalencia es $1\text{cm}=1^\circ$, si la cuerda está estirada (figura 2)

Ejercicios propuestos:

¿Cuál es la distancia angular entre dos estrellas de la misma constelación?

Usa el “medidor de ángulos” para calcular cuál es la distancia (en grados) entre Merak y Dubne de la Osa Mayor.

Un cuadrante simplificado: el cuadrante “pistola”

Una versión muy simplificada del cuadrante puede ser muy útil para medir ángulos. Aquí presentamos la versión “pistola” que es de fácil uso lo que favorece su utilización por los alumnos ante otros formatos más clásicos.

Para construirlo: Se necesita una pieza rectangu-

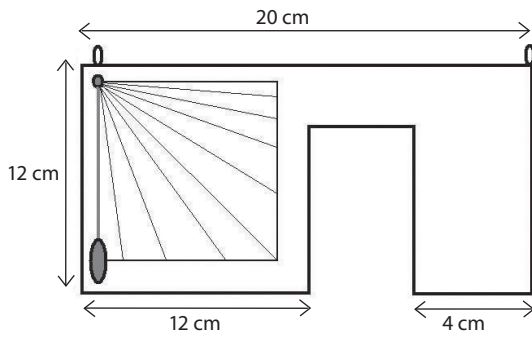


Fig. 3: Cuadrante “Pistola”.

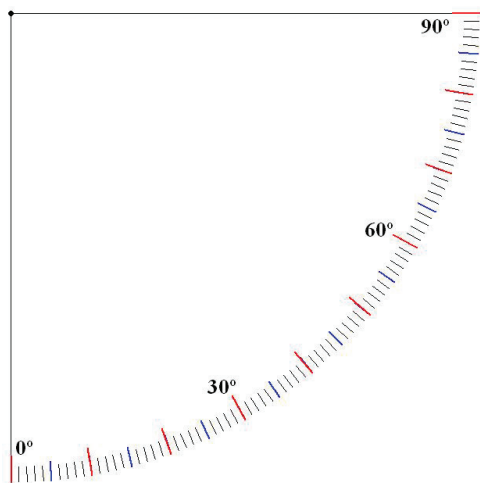


Fig. 4: Graduación de 90° para pegarlo en el cuadrante.

lar de cartón duro (de unos 12×20 cm). Se recorta un área rectangular como en la figura 1, con el fin de colocar ahí la mano. Se colocan dos escarpas redondas en el lado (figura 3).

En un cuadrante de papel (figura 4) con los ángulos indicados se pega (figura 3) de forma que una de las escarpas esté sobre la posición 0° (figura 3). Se ata una cuerda en la parte de arriba y, en la otra

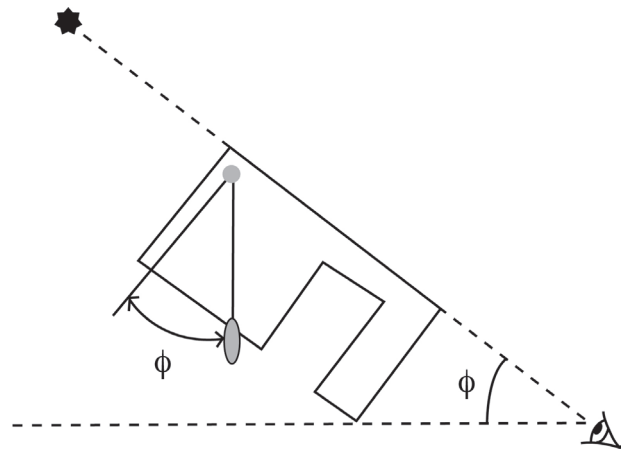


Fig. 5a y 5b: Usando el cuadrante de “pistola”.

punta, se fija un pequeño peso.

¿Cómo usarlo?:

- Cuando se ve el objeto a través de las dos escarpas la cuerda indica la posición angular referida a los 0° del horizonte (figura 5b).
- Una pajita que pase a través de las escarpas es un

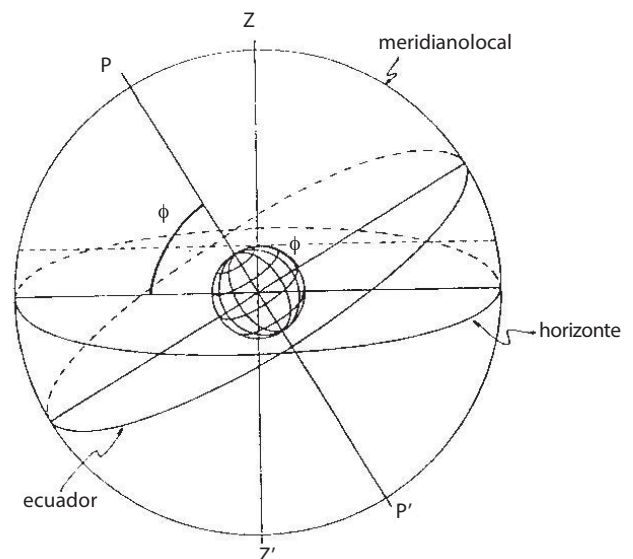


Fig. 6: La latitud del lugar ϕ es igual a la altura de la Polar.

visor excelente que nos permitirá medir la altura del Sol proyectando la imagen en un trozo de cartón blanco. ATENCIÓN: NO MIRAR NÚNC A AL SOL DIRECTAMENTE!!!

Ejercicios que se propone:

¿Cuál es la latitud de la escuela?

Usaremos el cuadrante para conocer la altura de la estrella Polar. La latitud de un lugar es igual a la altura de la Polar en dicho lugar (figura 6). También se puede usar el cuadrante para calcular (en la clase de mates) la altura de la escuela o de cualquier otro edificio cercano.

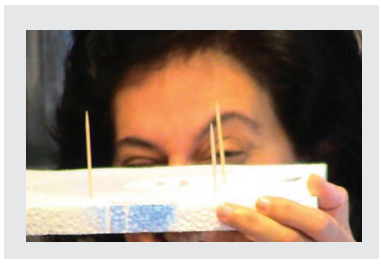
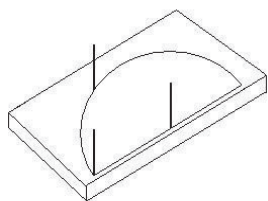


Fig. 7a y 7b: Como se usa el goniómetro horizontal

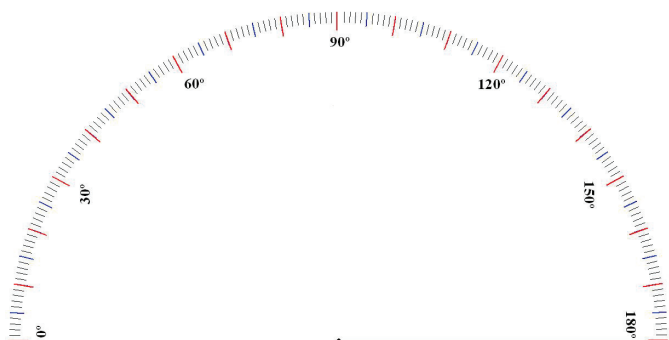


Fig. 8: Graduación de 180° para pegar en el goniómetro horizontal.

Goniómetro Horizontal

Una versión simplificada del goniómetro horizontal se puede utilizar para conocer la segunda coordenada necesaria para determinar la posición de un cuerpo celeste.

Para construir la herramienta:

Se corta un rectángulo de cartón de unos 12x20 (figura 7a). Se pega un semicírculo de papel (figura 8) con los ángulos indicados de forma que el diámetro del semicírculo esté en paralelo con el lado mayor del rectángulo. Utilizando tres "agujas" podemos marcar dos direcciones en el goniómetro (figura 7b).

Cómo se usa:

- Si queremos medir el acimut de una estrella tenemos que orientar la línea de partida del semicírculo en la dirección Norte-Sur.
- El acimut es el ángulo entre la línea Norte-Sur y la línea por el centro del círculo y la dirección del cuerpo.

Ejercicios propuestos:

¿Cuál es la posición de la Luna esta noche?

Usa el cuadrante y el goniómetro horizontal para calcular la altura y acimut de la Luna. Con el fin de estudiar el movimiento de la Luna durante la noche, se pueden determinar las dos coordenadas tres veces cada hora. De esta manera se puede comparar el movimiento de la Luna con el de las estrellas en el cielo.

El planisferio

Para reconocer las constelaciones se usan mapas de estrellas que dependen de la latitud del lugar. Construiremos uno de ellos aunque recomendamos ampliarlo con una fotocopidora.

Para construir el planisferio:

Usaremos una fotocopia de las constelaciones del cielo en un disco de "fondo blanco" y lo situaremos dentro de una bolsa según sea su latitud próxima al ecuador o no, y según sea el hemisferio.

Hemisferio norte

Para lugares situados en el hemisferio norte con latitudes comprendidas entre 0 y 20 grados es conveniente preparar dos planisferios, uno para cada horizonte. Para el horizonte norte recortaremos la ventana de la figura 9a por la línea de latitud continua correspondiente y doblaremos por la línea de puntos hasta conseguir una bolsa. En ella introduciremos el planisferio de la figura 10a. Con esta operación tendremos el planisferio del horizonte norte del lugar. Procedemos de forma análoga para tener el planisferio del horizonte sur. Recortando y doblando, como antes, la ventana de la figura 9b en introduciendo en su interior el mapa de estrellas de la figura 10a. Una vez terminados ambos planisferios usaremos los dos según estemos observando hacia el horizonte norte o sur.

Cuando deseemos observar en el hemisferio norte con latitudes comprendidas entre 30 y 70 grados basta recortar la ventana de la figura 9e por la línea continua y doblar por la línea de puntos hasta obtener una bolsa donde se introducirá el círculo de estrellas que hemos recortado anteriormente (figura 10a).

Hemisferio sur

Para lugares situados en el hemisferio sur con latitudes comprendidas entre 0 y 20 grados es conveniente preparar dos planisferios, uno para cada horizonte. Para el horizonte norte recortaremos la ventana de la figura 9c por la línea de latitud continua correspondiente y doblaremos por la línea

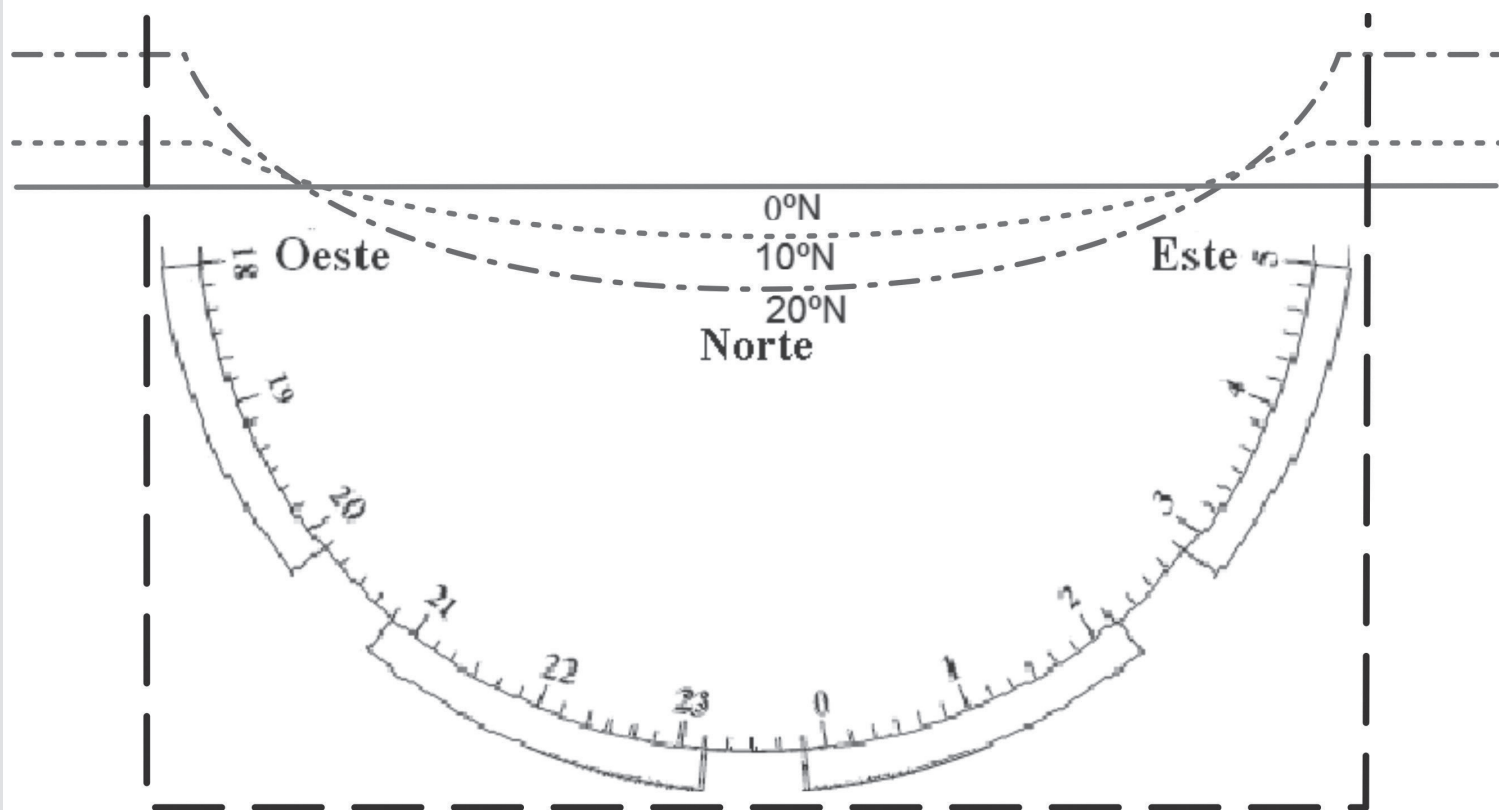


Fig. 9a: Bolsa para el horizonte norte (latitud 0, 10 y 20 Norte).

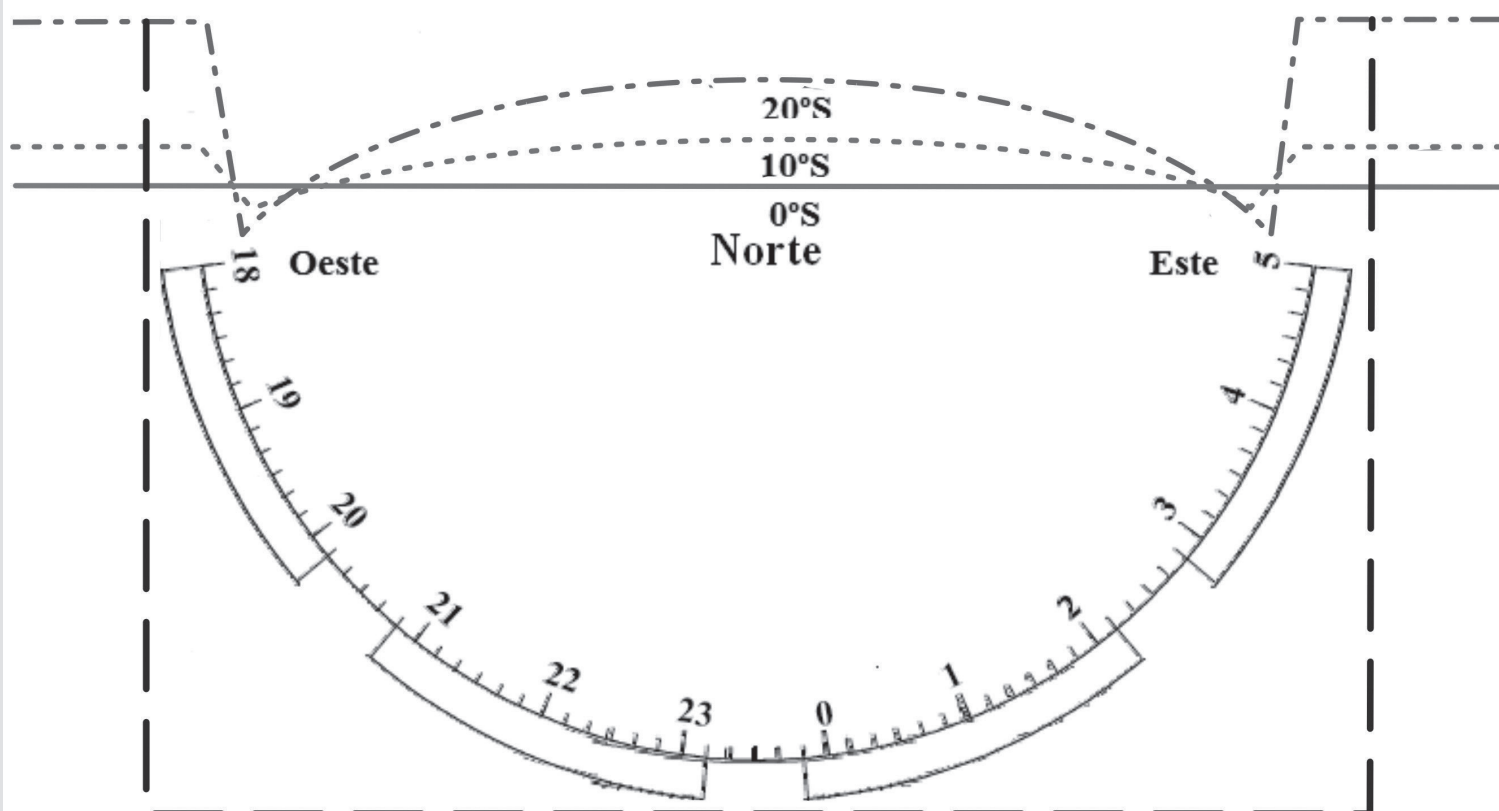


Fig. 9c: Bolsa para el horizonte sur (latitud 0, 10 y 20 Norte).

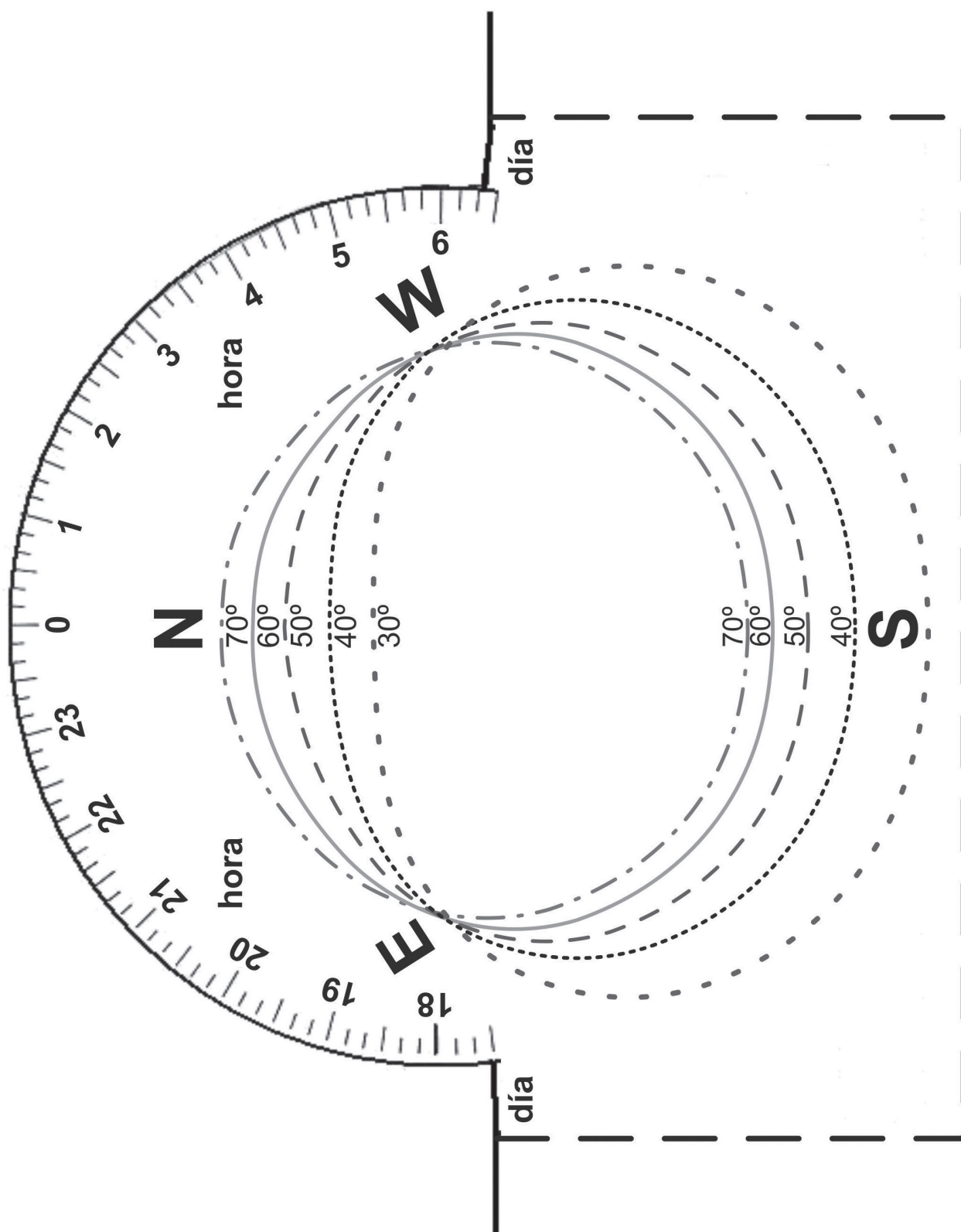


Fig. 9e: Bolsa para el hemisferio norte para ambos horizontes. Latitudes de 30° a 70° Norte.

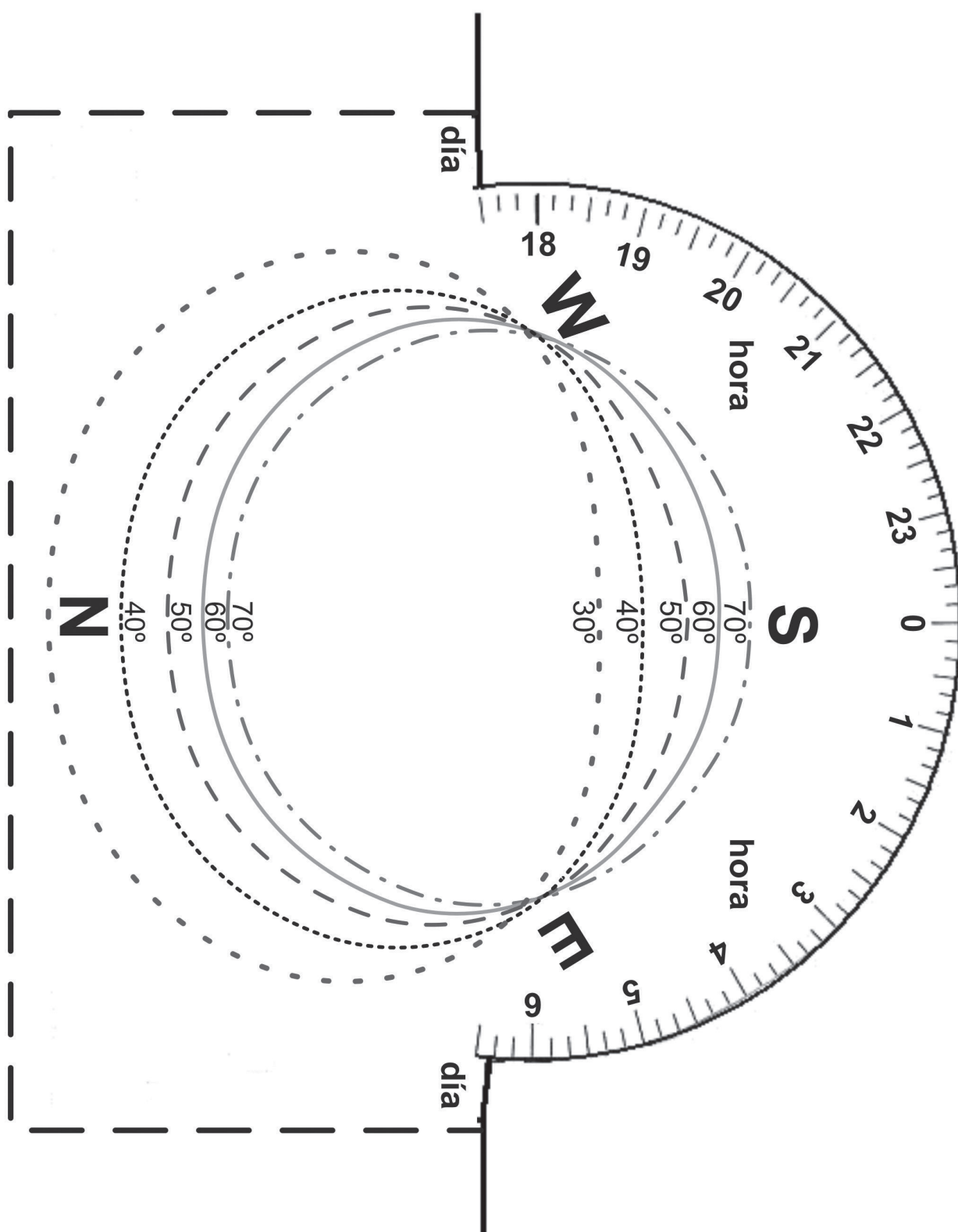


Fig. 9f: Bolsa para el hemisferio sur para ambos horizontes. Latitudes de 30° a 70° Sur.

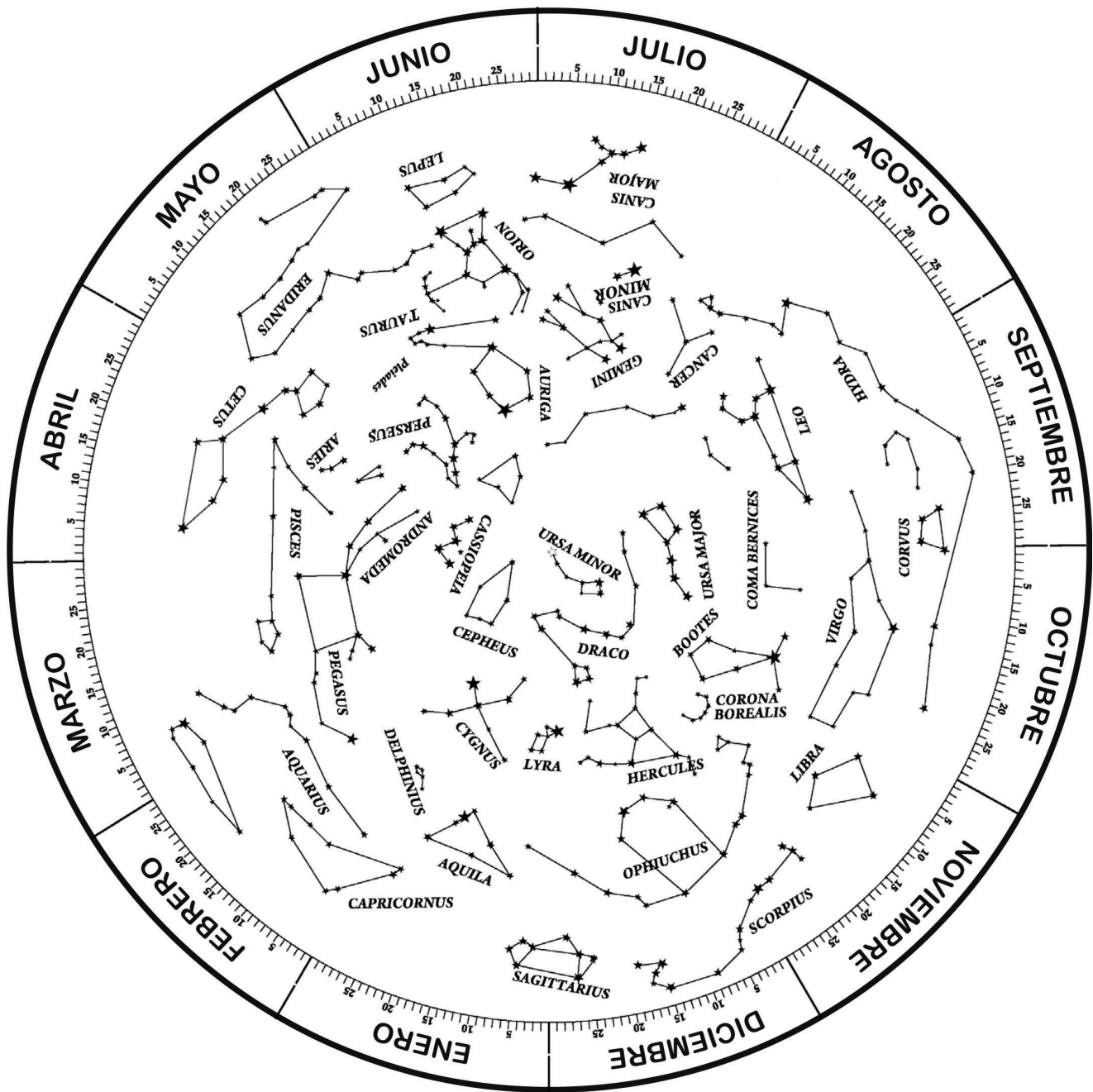


Fig. 10a: El disco o mapa estelar que se pone dentro de la bolsa. Hemisferio norte.

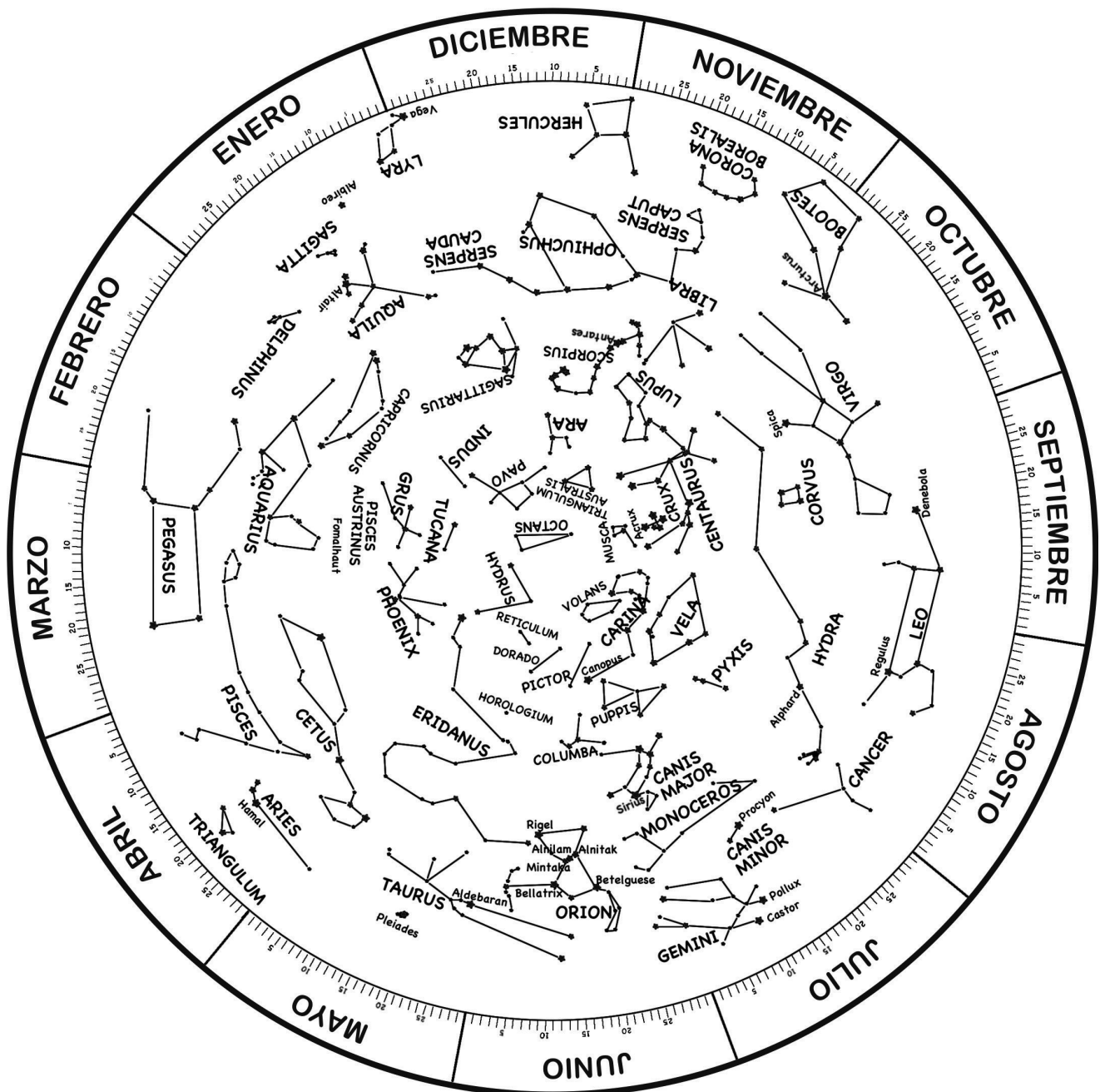


Fig. 10b: El disco o mapa estelar que se pone dentro de la bolsa. Hemisferio sur.

de puntos hasta conseguir una bolsa. En ella introduciremos el planisferio de la figura 10b. Con esta operación tendremos el planisferio del horizonte sur del lugar. Procedemos de forma análoga para tener el planisferio del horizonte sur. Recortando y doblando, como antes, la ventana de la figura 9d en introduciendo en su interior el mapa de estrellas de la figura 10b. Una vez terminados ambos planisferios usaremos los dos según estemos observando hacia el horizonte norte o sur.

Cuando deseemos observar en el hemisferio sur con latitudes comprendidas entre 30 y 70 grados basta recortar la ventana de la figura 9f por la línea continua y doblar por la línea de puntos hasta obtener una bolsa donde se introducirá el círculo de estrellas que hemos recortado anteriormente (figura 10b).

¿Cómo se usa?:

Se coloca la fecha del día en que vamos a observar alineada con la hora de observación girando el círculo de estrellas y se usa el planisferio mirando al cielo en la dirección indicada. La parte del cielo que puede verse aparece no tapada por el papel.

Atención: Un planisferio se usa como un paraguas. Es un mapa del cielo y debemos situarlo por encima de nuestra cabeza para poder reconocer las constelaciones.

Ejercicios propuestos:

¿Qué cielo podemos ver esta noche?

Usa el planisferio que has hecho para la latitud de tu escuela, solo tienes que girar el disco estelar hasta que la fecha de hoy coincida con la hora que planeas salir a observar.

Ten en cuenta que el planisferio es un “mapa de estrellas” y que tienes que levantarlo sobre tu cabeza “como un paraguas” (no es un mapa de tu ciudad!).

Espectroscopio

Al pasar la luz del Sol por este sencillo instrumento el alumno podrá visualizar la descomposición de la luz. Es una forma sencilla de observar el espectro

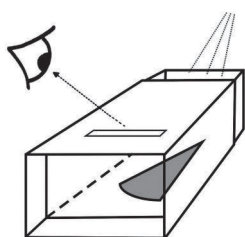


Fig. 11a y 11b: Como se usa el espectroscopio.

solar con un instrumento construido por los propios alumnos.

Construcción del espectroscopio:

Pintad el interior de una caja grande de cerillas (tamaño usual para las cerillas de cocina). Haced un corte longitudinal (figura 11b) por donde el observador pueda mirar el espectro en el interior de la caja. Cortar un CD inservible en ocho partes iguales y pegar una de dichas partes en el fondo del interior de la caja de cerilla, con la zona de la grabación hacia arriba. Cerrad la caja dejando sólo una rendija abierta en la zona opuesta de donde habéis abierto el visor.

¿Cómo se usa?:

• Dirigid la caja de cerillas de forma que la luz del Sol se cuele por la rendija abierta y observar por el visor (figura 11a).

• Veréis en el interior de la caja de cerillas la descomposición de la luz solar en los colores del espectro.

Ejercicio propuesto:

Comparad el espectro solar con el de un fluorescente u otras lámparas que haya en la escuela.

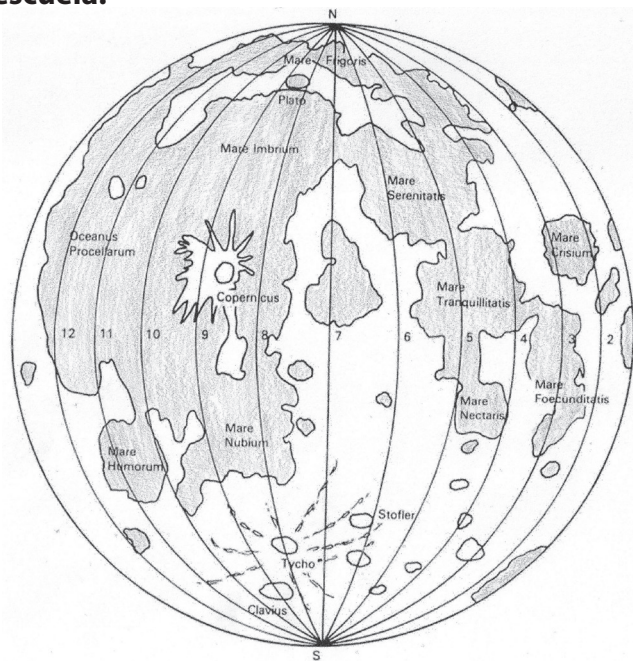


Fig. 12: Mapa esquemático de la Luna, tal como se observa desde el hemisferio norte.

Podréis observar las variaciones que aparecen en el espectro según el tipo de lámpara que estéis considerando.

Mapa de la Luna

Es bueno incluir una versión simplificada de un mapa lunar que incluya el nombre de los mares y de algunos de los cráteres que pueden observarse

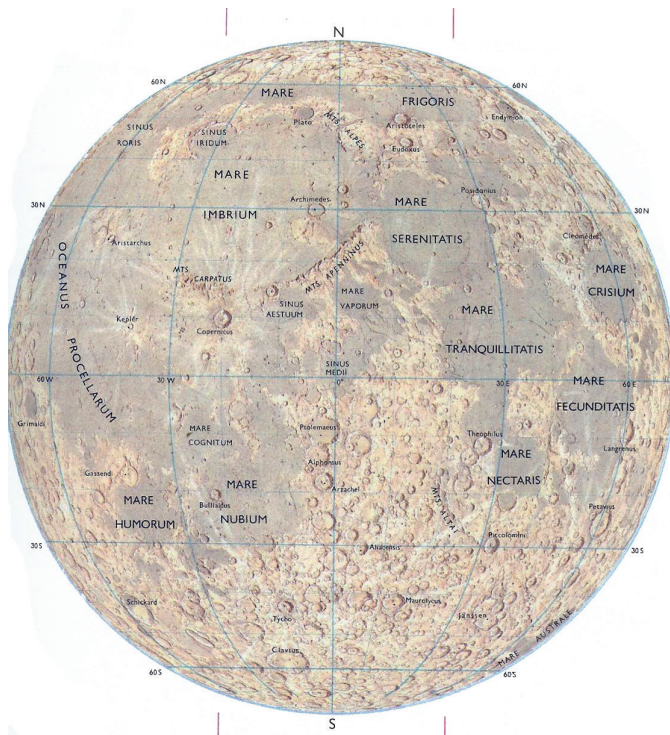


Fig. 13: Mapa simplificado de la Luna.

con prismáticos o con un pequeño telescopio.

Para construirlo:

Se necesita una pieza cuadrada de cartón duro (de unos 20x20 cm) donde se pega la figura 12 o la 13.

¿Cómo usarlo?:

El mapa de la Luna deberéis usarlo tal como esta aquí o al revés dependiendo de si estáis utilizando unos prismáticos o un telescopio (invierte la imagen) y también depende de si estáis observando desde el hemisferio norte o sur. En cualquier caso, lo más sencillo es empezar por identificar los mares, comprobar que la posición es correcta y después seguir identificando los demás accidentes lunares.

Ejercicio que se propone:

¿Cuál es el cráter de Tycho?

Observa la Luna un día que este más de la mitad iluminada e identifica en la zona central un cráter



Fig. 14: El maletín

con un gran sistema de radiantes (líneas que salen del cráter y se dirigen en todas direcciones cruzando la superficie del satélite).

La colocación en el maletín

Preparamos una bolsa de papel con una hoja en el lado superior de la caja abierta (figura 14) para poner el planisferio, el mapa de la Luna, el reloj solar etc.

En la parte profunda de la caja colocamos los instrumentos de forma que no pueden moverse, usando clips, alfileres, pequeños cinturones y cintos. El tornillo del cuadrante debe fijarse en torno al centro porque la maleta contiene instrumentos delicados y pueden balancearse al manejarla. Un grupo de alumnos propuso colocar una lista en el exterior de la maleta indicando el contenido de ésta, así se estaría seguro de haber recogido todo al finalizar la actividad.

Además, de la etiqueta con su nombre y cuantos adornos se les ocurra con el fin de personalizar el maletín.

Conclusiones

Observar como se mueve el cielo durante la noche, el día y a lo largo del año es imprescindible para los jóvenes astrónomos. Con esta clase de proyectos es posible:

- Que los alumnos adquieran confianza con las medidas;
- Que se responsabilicen de sus propios instrumentos;
- Que desarrollen su creatividad y habilidad manual;
- Que entiendan la importancia de la recogida sistemática de datos;
- Que les facilite la comprensión de instrumentos más sofisticados;
- Que reconozcan la importancia de la observación a simple vista, antes y ahora.

Bibliografía

- Palici di Suni, C., "First Aid Kit, What is necessary for a good astronomer to do an Observation in any moment?", Proceedings of 9th EAAE International Summer School, 99, 116, Barcelona, 2005.
- Palici di Suni, C., Ros, R.M., Viñuales, E., Dahringer, F., "Equipo de Astronomía para jóvenes astrónomos", Proceedings of 10th EAAE International Summer School, Vol. 2, 54, 68, Barcelona, 2006.
- Ros, R.M., Capell, A., Colom, J., El planisferio y 40 actividades más, Antares, Barcelona, 2005.

Espectro solar y manchas solares

Alexandre Costa, Beatriz García, Ricardo Moreno

International Astronomical Union, Escola Secundária de Loulé (Portugal), Universidad Tecnológica Nacional (Mendoza, Argentina), Colegio Retamar (Madrid, España)

Resumen

Este taller incluye un enfoque teórico del espectro de la luz del Sol que se puede utilizar en la escuela secundaria. Las experiencias son válidas para primaria y secundaria.

El Sol es la principal fuente de casi todas las bandas de radiación, sin embargo, como nuestra atmósfera tiene una alta absorción de varias de las longitudes de onda no visibles, sólo se consideran los experimentos relacionados con el espectro visible, que es la parte del espectro que está presente en la vida cotidiana de los estudiantes. Para las experiencias en regiones no visibles ver el taller correspondiente.

En primer lugar se presenta la teoría, seguida por demostraciones experimentales de todos los conceptos desarrollados. Estas actividades son experimentos sencillos que los maestros pueden reproducir en su clase en la introducción de los temas como la polarización, la extinción, la radiación de cuerpo negro, el espectro continuo, la línea del espectro, el espectro de absorción (por ejemplo, la luz solar) y las líneas de Fraunhofer.

Se discuten las diferencias entre la superficie de emisión solar común y las emisiones de las manchas solares. También se mencionan la evidencia de la rotación de la energía solar y la forma en que este concepto puede ser utilizado en proyectos para escolares.

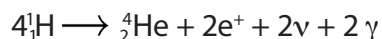
Objetivos

- Comprender cómo se produce la radiación solar
- Comprender el por qué del espectro de Sol y su utilidad.
- Comprender qué son las manchas solares.
- Estudiar algunos aspectos de la luz: polarización, dispersión, etc.

La Radiación Solar

La energía solar es creada en el interior del Sol, en una región que recibe el nombre de núcleo y don-

de la temperatura llega a los 15 millones de grados y la presión es altísima. Las condiciones de presión y temperatura del núcleo suelen permitir que tengan lugar reacciones nucleares. En la principal reacción nuclear que ocurre en el núcleo del Sol, cuatro protones (núcleos de hidrógeno) son transformados en partículas alfa (núcleos de helio) generando también dos positrones, dos neutrinos y dos fotones gamma de acuerdo con la ecuación



La masa resultante es menor que la de los cuatro protones juntos. Esta pérdida de masa, según la ecuación de Einstein, implica una generación de energía.

$$E=mc^2$$

Cada segundo, 600 millones de toneladas de hidrógeno se transforman en helio, pero hay una pérdida de entre 4 y 5 millones de toneladas que se convierten en energía. Aunque puede parecer una pérdida muy grande, la masa del Sol es tal que puede funcionar así miles de millones de años.

La energía producida en el interior del Sol va a seguir un largo recorrido hasta llegar a la superficie del Sol.

Después de emitida por el Sol, esa energía se propaga por todo el espacio a una velocidad de 299 793 km/s en forma de radiación electromagnética.

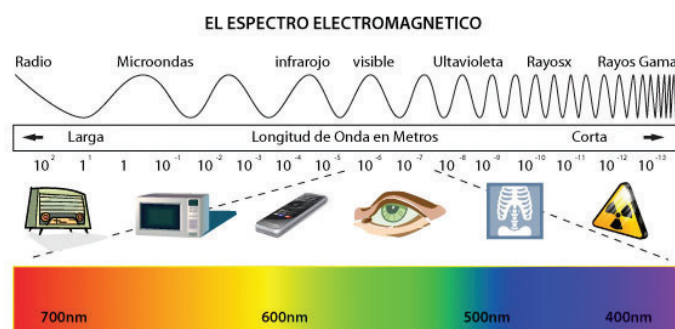


Fig. 1: El Espectro electromagnético.

La radiación electromagnética puede presentar longitudes de onda o frecuencias que están por lo general agrupados en diferentes regiones como se muestra en la figura 1.

La frecuencia ν , la longitud de onda λ y la velocidad de la luz c están relacionadas entre sí por la expresión,

$$c = \lambda \cdot \nu$$

A pesar de que el Sol es una fuente importante de muchas longitudes de onda, haremos la mayor parte de nuestro enfoque de la radiación solar usando el espectro visible porque, a excepción de las frecuencias de radio y unas pequeñas bandas en el infrarrojo o el ultravioleta, son aquellas a las cuales nuestra atmósfera es transparente y no se necesitan aparatos complejos para visualizarlas. Por lo

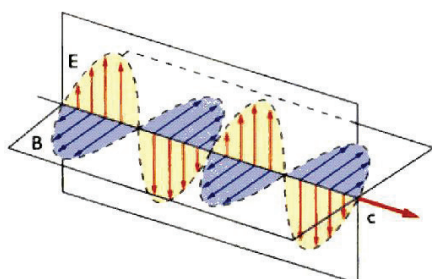


Fig. 2: Luz polarizada

tanto, son las mejores para la experimentación en el aula.

Polarización de la Luz

Una radiación electromagnética perfecta y linealmente polarizada tiene un perfil como el que se presenta en la figura 2. Se dice que está linealmente polarizada porque vibra en unos planos.

La luz del Sol no tiene ninguna dirección de vibración privilegiada, aunque puede ser polarizada al reflejarse bajo un ángulo determinado, o si se pasa

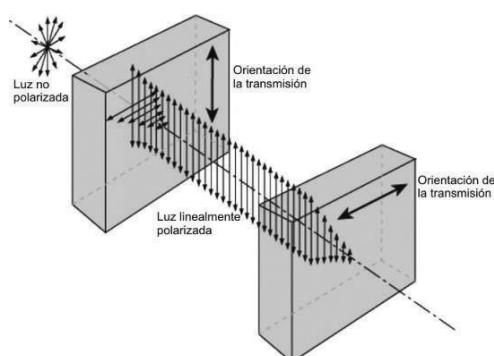


Fig. 3: Cuando los dos filtros tienen una orientación de transmisión perpendicular, la luz que pasa el primero es bloqueada por el segundo.

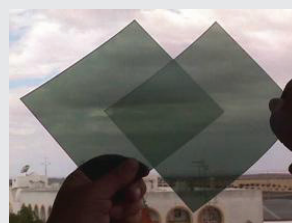


Fig. 4a: Si los filtros tienen la misma orientación la luz pasa a través de ellos.

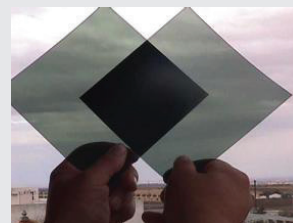


Fig. 4b: Si se gira uno de los filtros 90° la luz queda bloqueada.

por determinados filtros, llamados Polaroides.

La luz, al pasar por uno de esos filtros (figura 3), vibra sólo en un plano. Si se pone un segundo filtro, pueden ocurrir dos cosas: cuando los dos filtros tengan orientaciones de polarización paralelas, la luz pasa a través de ellos (figura 4a), y si las tienen perpendiculares, la luz que pasa por el primer filtro

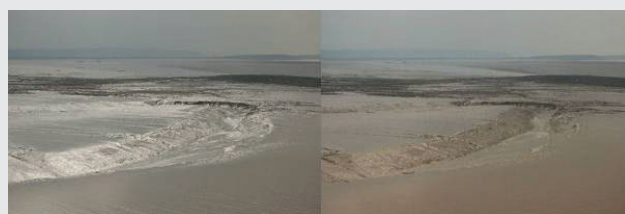


Fig. 5a y 5b: Luz reflejada, fotografiada con y sin filtro polaroid

queda bloqueada por el segundo (figura 3) y los filtros se oscurecen (figura 4b).

Muchas gafas de sol llevan polarizadores para filtrar la luz reflejada, abundante en la nieve o en el mar, y que suele estar polarizada (figuras 5a y 5b). También en fotografía se usan filtros polarizadores, con los que se eliminan algunos reflejos y además el cielo aparece más oscuro.

Actividad 1: Polarización de la Luz

Para hacernos con filtros polarizadores cortamos por el puente de la nariz las dos partes de unas gafas 3D incoloras (las gafas 3D verdes/rojas no sirven para esta experiencia) y podemos hacer la experiencia de las figuras 4a y 4b con ambos filtros. También se pueden usar gafas de sol buenas, que sean polarizadas: para cruzarlas se pueden usar dos gafas y así no romper ninguna.

Las pantallas LCD de ordenadores y de televisión (no las de plasma) emiten luz que está polarizada. Se puede comprobar mirando la pantalla de un ordenador portátil con las gafas de sol polarizadas y girando la cabeza: si llevan polarizadores, con un

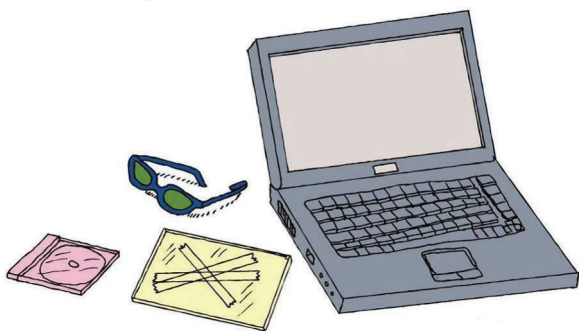


Fig. 6: La luz de la pantalla TFT de un ordenador es polarizada, y la cinta adhesiva gira el ángulo de polarización. Se observan colores si se mira con gafas de sol polarizadas.

determinado ángulo la pantalla se ve negra.

Hay algunos plásticos y cristales que, si se pasa a través de ellos luz polarizada, giran un poco el plano en el que vibra la luz. El ángulo girado depende del color de la luz, del grosor del cristal y de su composición. Si se mira con unas gafas de sol polarizadas, según qué ángulo, se extingue uno u otro color, y la luz que llega al ojo es de distintos colores. Pegamos en un cristal (puede ser de un marco de fotos) varias tiras de cinta adhesiva, de tal forma que en unas zonas haya tres capas de cinta una encima de otra, en otras zonas dos y en otras sólo una (figura 6). En una televisión u ordenador con pantalla LCD, ponemos una imagen que tenga la mayor parte blanca, por ejemplo, un documento en blanco de un procesador de texto. Situamos el cristal delante de la pantalla, y lo miramos con las gafas de sol polarizadas. Si giramos el cristal, observaremos la cinta adhesiva de distintos colores. En lugar del cristal, podemos mirar el plástico transparente de una caja de CD. Observaremos los puntos donde hay más tensión concentrada. Si retorremos ligeramente la caja, veremos que las zonas de tensión cambian.

La estructura del Sol

El Sol tiene una estructura que podemos dividir en cinco partes principales :

1) El núcleo y la zona de radiativa son los lugares donde se producen las reacciones de fusión termo-nuclear. Las temperaturas en el interior del núcleo son de 15 millones de grados K y algo menores en la zona radiativa, del orden de 8 000 000 K. En toda la región más cercana al núcleo la transferencia de energía se hace por radiación. Podrían considerarse dos regiones distintas (el núcleo y la zona radiativa) sin embargo es muy difícil decir donde termina uno y donde empieza el otro porque sus funciones están mezcladas.

2) La zona de convección, donde la energía es transportada por convección, con temperaturas inferiores a 500 000 K, entre los 0,3 radio del Sol y justo debajo de la fotosfera.

3) La fotosfera, que podríamos considerar de alguna forma la "superficie" del Sol, es el origen de los espectros de absorción y continuo, y tiene temperaturas que van desde 6400 a 4200 K. Está fragmentado en unas celdas de unos 1000 km de tamaño, que duran sólo algunas horas. Además suele tener algunas zonas más frías ("sólo" 4.200 K), que se ven como manchas oscuras.

4) La cromosfera, que es exterior a la fotosfera y que tiene una temperatura de 4.200 a 1 millón de K. Tiene un aspecto de filamentos verticales que lo asemejan a una "pradera ardiente". Hay prominencias (protuberancias) y fulguraciones.

5) La corona, que es la fuente del viento solar, tiene temperaturas comprendidas entre uno y dos millones de grados K.

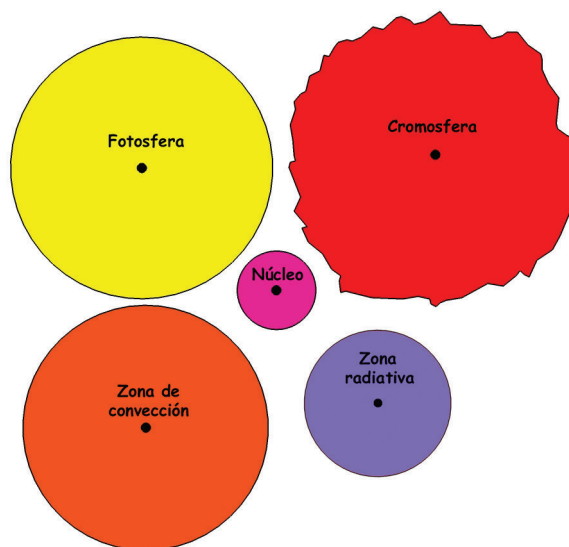


Fig 7: Partes del Sol, para recortar.

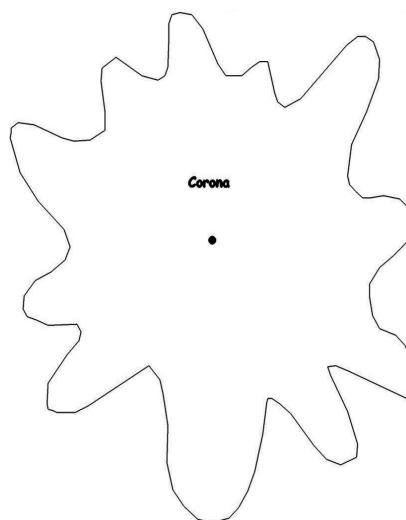


Fig 8: Corona para recortar.

Actividad 2: Modelo sencillo de las capas del Sol

Esta actividad se puede hacer con niños pequeños. Se trata de recortar las diferentes figuras que aparecen a continuación (figuras 7 y 8). Se pueden recortar sobre papeles de colores diferentes o pintarlas con los colores siguientes: Corona en blanco, Cromosfera en rojo, Fotósfera en amarillo, Zona de convección en naranja, Zona radiativa en azul y el Núcleo en color granate.

Finalmente se pueden pegar una sobre otra, en el orden adecuado (el tamaño de cada pieza también indica ese orden).

Manchas solares

En la fotósfera se observan con frecuencia manchas oscuras. Típicamente una mancha solar consta de una región central oscura denominada sombra o umbra, rodeada por una zona más clara o penumbra que tiene filamentos claros y oscuros que parten de forma aproximadamente radial de la sombra. Los filamentos de la mancha solar están cercados por los gránulos típicos de la fotósfera (figura 9).

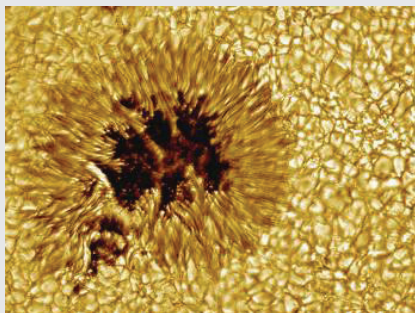


Fig. 9: Zoom de una mancha solar. (Foto: Vacuum Tower Telescope, NSO, NOAO).

Las manchas parecen negras con un pequeño telescopio. Sin embargo, eso es solamente un efecto de contraste. Cualquier mancha visible con un pequeño telescopio por más pequeña que sea si estuviera aislada nos alumbraría mucho más que la Luna llena. La diferencia de intensidad de las manchas se debe a tener una temperatura de 500 a 2.000°C inferior a la de la fotósfera circundante. Las manchas solares son el resultado de la interacción de fuertes campos magnéticos verticales con la fotósfera.

Las manchas solares tienen una importancia histórica muy grande pues permitieron a Galileo determinar el período de rotación del Sol y verificar que su rotación era diferencial, es decir, que giraba más rápido en el ecuador (período de rotación 25,05 días) que en los polos (período de rotación 34,3 días).

Actividad 3: Determinación del período de rotación del Sol

Otro experimento sencillo que se puede realizar en el aula es la medición del período de rotación solar utilizando las manchas solares. En este experimento, se debe hacer el seguimiento de las manchas solares durante varios días con el fin de medir su rotación. Las observaciones solares se deben hacer siempre por proyección con un telescopio (figura 10a) o prismáticos (figura 10b). Hay que insistir que nunca se debe mirar al Sol ni directamente ni mucho menos con prismáticos o telescopios, ya que se pueden producir daños irreparables en los ojos.

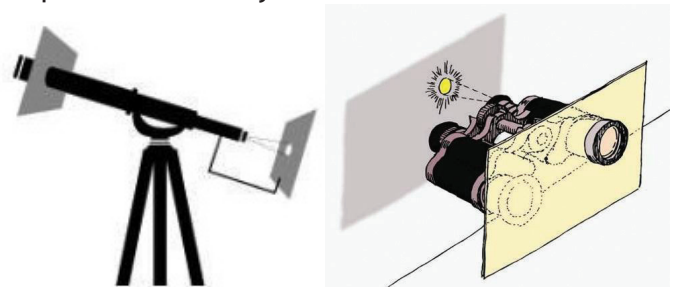


Fig. 10a: Observación solar por proyección con un telescopio (nunca se debe mirar directamente al Sol).

Fig. 10b: Observación por proyección con unos prismáticos (nunca directamente).

Si hacemos la observación de manchas solares durante varios días, el movimiento de una mancha será similar a como se ve, por ejemplo, en la figura 11.

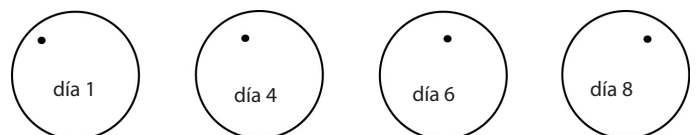


Fig. 11: Cambio de posición de una mancha a lo largo de varios días.

Podremos sobreponerlas en una transparencia como se presenta en la figura 12. El periodo T puede entonces ser calculado simplemente a través de una proporcionalidad sencilla:

$$T/t = 360^\circ/\alpha.$$

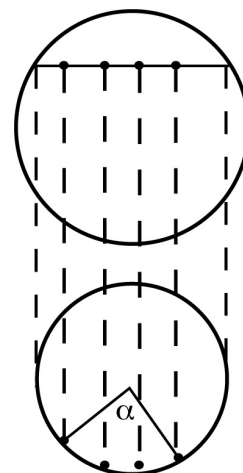


Fig. 12: Determinación de la rotación angular de las manchas solares.

Donde t indica el intervalo de tiempo entre dos observaciones de la misma mancha, α es el ángulo central entre el desplazamiento de las dos manchas consideradas (figura 12) y T es el período de rotación solar que se desea calcular. Esta determinación ofrece un buen nivel de precisión.

Veamos un ejemplo real. La figura 13 es una superposición de dos fotografías, tomadas el 12 de agosto de 1999 y el 19 de ese mismo mes y año. Dibujamos la circunferencia que describe la mancha, medimos el ángulo y sale 92° . Por tanto la rotación solar será:

$$T = \frac{360^\circ \cdot 7 \text{ días}}{92^\circ} = 27,3 \text{ días}$$

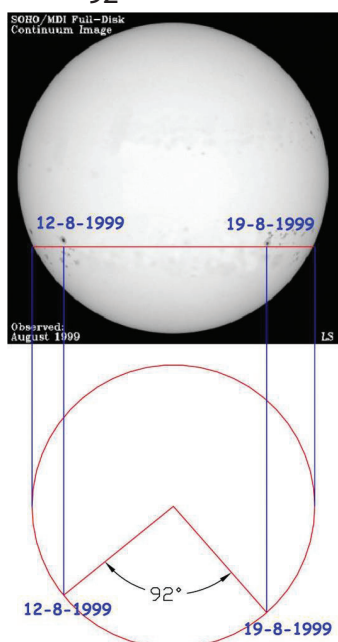


Fig.13:Determinación del periodo de rotación solar

La Radiación que sale del Sol

El Sol es un gran reactor nuclear, donde enormes cantidades de energía se producen de forma permanente. La energía se transporta a la superficie en forma de fotones. Los fotones son las partículas responsables de la radiación electromagnética y el valor de la energía por ellos transportada puede ser calculado por la expresión

$$E = h \cdot \nu$$

donde E es la energía de los fotones, h es la constante de Planck ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) y ν es la frecuencia de la radiación electromagnética asociada con el fotón. Los fotones generados por el Sol son los responsables de su espectro.

La luminosidad (o potencia, que es lo mismo) total del Sol es enorme: cada segundo emite más que trillones de bombas atómicas. La transmisión de esa energía a través del espacio podemos imaginarla como si se hiciese en una burbuja que se va haciendo más y más grande con la distancia.

El área de esa esfera es $4\pi R^2$. Si la potencia del Sol es P , la energía que llega a un metro cuadrado situado a una distancia R es:

$$E = \frac{P}{4\pi R^2}$$

Con otras palabras: la energía se transmite de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Y si sabemos la distancia del objeto, podemos calcular su potencia total.

Actividad 4: Determinación de la luminosidad del Sol

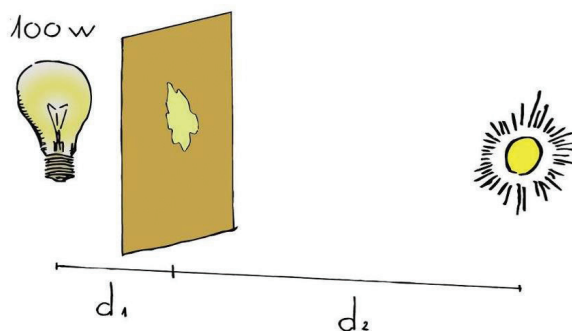


Fig. 14: Comparando la potencia del Sol con una bombilla de 100 W

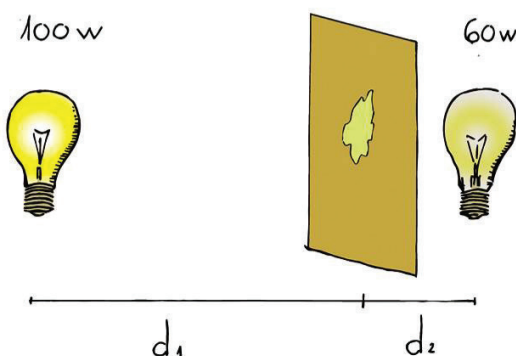


Fig. 15: Si la iluminación que llega a cada lado es la misma, la mancha de aceite no se ve.

La luminosidad o potencia del Sol es la energía que emite nuestro astro rey en un segundo. Y realmente el Sol es una fuente luminosa muy potente. Vamos a calcular su potencia comparándolo con una bombilla de 100 W (figura 14).

Vamos a construir un fotómetro que nos permita comparar la luminosidad de dos fuentes de luz. Para ello echamos un par de gotas de aceite en medio de una hoja de papel de envolver, aunque también sirve el papel blanco normal. La mancha que se forma hace que se transparente un poco el papel. Ese será nuestro fotómetro. Al ponerlo entre dos fuentes luminosas (figuras 14 a 16), se puede ajustar la distancia para que no se vea la mancha. Entonces se ha igualado la iluminación en los lados del papel y la energía que llega a cada lado es la misma.



Fig. 16 Fotómetro de mancha de aceite, entre dos bombillas.

En ese caso:

$$\frac{100}{4 \cdot \pi \cdot d_1^2} = \frac{60}{4 \cdot \pi \cdot d_2^2}$$

En un día soleado, sacamos al aire libre el fotómetro y una bombilla de al menos 100 w (cuanto más, mejor). Ponemos el fotómetro entre el Sol y la bombilla, a una distancia tal que los dos lados del fotómetro aparezcan igualmente brillantes. Medimos la distancia d_1 , en metros, del fotómetro al filamento de la bombilla.

Sabiendo que la distancia del Sol a la Tierra es aproximadamente $d_2 = 150.000.000$ km, podemos calcular la potencia del Sol P con la ley inversa de cuadrados (no aparece el término de $4\pi^2$ porque estaría en los dos lados de la igualdad):

$$\frac{100 \text{ W}}{d_1^2} = \frac{P_{\text{Sol}}}{d_2^2}$$

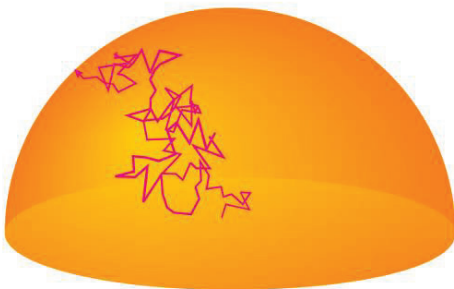


Fig. 17: Los fotones tardan 1 millón de años en llegar a la fotosfera desde el núcleo.

El resultado no debe diferir mucho de la luminosidad real del Sol, que es de $3,83 \cdot 10^{26}$ W.

Opacidad

La energía asociada a un fotón de mucha energía producido en el núcleo del Sol va a tardar hasta 1 millón de años en llegar a la fotosfera, puesto que en las partes más interiores del Sol los fotones interactúan con la materia, muy densa en esas zonas. Las interacciones se producen en un número muy grande desde la generación de los fotones, mien-

Cuando la radiación llega a la fotosfera, y, por consiguiente, a la atmósfera del Sol, es irradiada hacia el exterior casi sin interacciones en la mayor parte de las longitudes de onda producidas, dando lugar a la salida de la fotosfera lo que llamamos un espectro continuo. Eso ocurre porque el núcleo y el interior del Sol son opacos a todas las longitudes de onda de radiación y su atmósfera es transparente. En astronomía los conceptos de opaco y transparente son un poco distintos de lo que ocurre en lo cotidiano.

Un gas puede ser transparente u opaco dependiendo solamente del hecho de si absorbe los fotones que lo cruzan o no. Por ejemplo, nuestra atmósfera es transparente a las longitudes de onda visibles. Sin embargo, en un día con niebla, no se verá mucho, por lo que será opaca.

Es necesario tener claro que transparente no significa invisible. Una llama de un mechero es transparente a las longitudes de onda de un retroproyector.

Actividad 5: Transparencia y opacidad

Se puede presentar esos conceptos usando un mechero o una vela (el mechero es mejor que la vela, pues la vela no va a tardar en producir humo negro, porque su combustión es incompleta, el humo negro es opaco y se verá saliendo de la llama de la vela).

La demostración es muy sencilla. Se ponen objetos transparentes y opacos en el chorro de la luz de

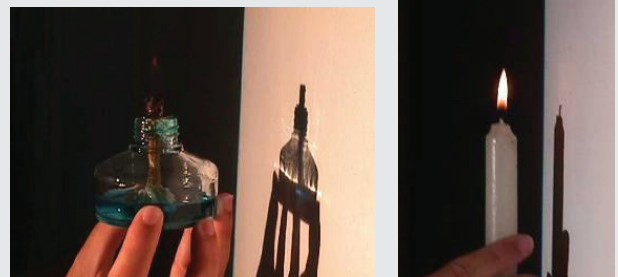


Fig. 18a y 18b: La llama de una lámpara de alcohol o de una vela no produce sombra en la pared. Véase que el vidrio, del mechero, no es completamente transparente.

La llama de una vela, de un mechero Bunsen o uno de esos mecheros que usan todos los fumadores también es transparente y es sorprendente para los alumnos comprobar que la llama no produce ninguna sombra en la pared (figuras 18a y 18b). Se puede explicar que así es la fotósfera, que es transparente a casi toda radiación.

Espectros

En 1701, Newton usó un prisma y descompuso por primera vez la luz solar en colores. Cualquier luz se puede descomponer con un prisma o una red de difracción, y lo que se obtiene es su espectro. Los espectros pueden explicarse a través de las tres leyes que Gustav Kirchhoff y Robert Bunsen descubrieran en el siglo XIX. Las tres leyes están representadas en la figura 19.

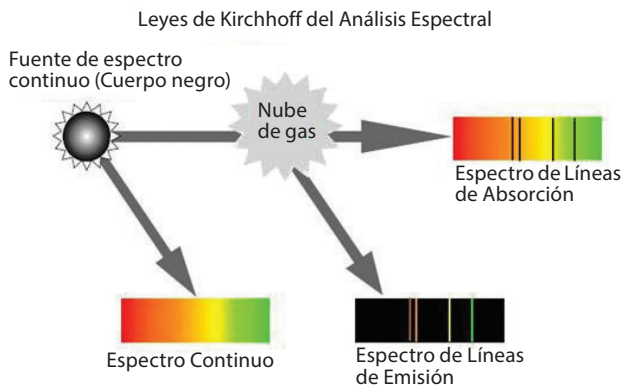


Fig. 19: Leyes de Kirchhoff y Bunsen.

- 1ª Ley: Un objeto sólido incandescente produce luz con un espectro continuo.
- 2ª Ley: Un gas tenue caliente produce luz con líneas espectrales en longitudes de onda discretas que dependen de la composición química del gas.
- 3ª Ley: Un objeto sólido incandescente rodeado de un gas a baja presión produce un espectro continuo con huecos en longitudes de onda discretas cuyas posiciones dependen de la composición química del gas, y coinciden con las de la 2ª Ley.

Las líneas de emisión del gas tenue son debidas a las transiciones electrónicas entre dos niveles de energía, que ocurren cuando los fotones interactúan con la materia. Como sería más tarde explicado por Niels Bohr, los niveles de energía en los átomos están perfectamente cuantizados y por eso las frecuencias emitidas son siempre las mismas, pues la diferencia de energía entre los niveles es constante (figura 20).

Entonces, un gas frío puede absorber la misma energía que emite cuando está caliente y, por eso, si se pone el gas entre una fuente incandescente

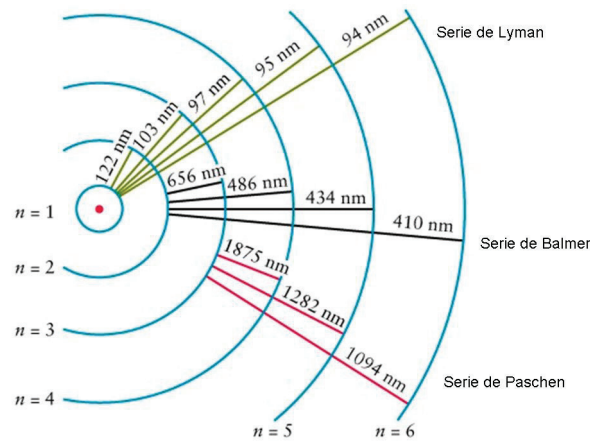


Fig. 20: Series espectrales para la emisión del átomo de hidrógeno. Las transiciones posibles tienen siempre la misma diferencia de energía entre los niveles.

y un espectroscopio, el gas absorbe las mismas líneas en el espectro continuo de la fuente de incandescencia que cuando el gas emite cuando está caliente, generando en el primer caso el espectro de absorción.

Esto es lo que sucede en la atmósfera del Sol. Los elementos contenidos en el gas de la atmósfera solar absorben las frecuencias asociadas a las líneas espectrales de esos elementos. Ese hecho fue verificado por Joseph Fraunhofer en 1814, que llegó a catalogar hasta 700 líneas oscuras en el espectro del Sol, que se llaman líneas de Fraunhofer.

Letra	Longitud de onda (nm)	Origen químico	Rango de color
A	759	O ₂ atmosférico	rojo oscuro
B	687	O ₂ atmosférico	rojo
C	656	Hidrogeno alpha	rojo
D1	590	Sodio neutro	rojo anaranjado
D2	589	Sodio neutro	amarillo
E	527	Hierro neutro	verde
F	486	H beta	cian
G	431	CH molecular	azul
H	397	Calcio ionizado	violeta oscuro
K	393	Calcio ionizado	violeta oscuro

Tabla 1: Líneas de Fraunhofer del Sol.

Las principales se presentan en la tabla siguiente, respetando la designación original de Fraunhofer (1817) de las letras para las líneas de absorción en el espectro solar.

Es importante darse cuenta de que analizando la luz que nos llega del Sol o de una estrella, podemos saber de qué está hecha, sin necesidad de ir

hasta allí. Hoy día los espectros se toman con alta resolución, detectando múltiples líneas.

Radiación de cuerpo negro

Cuando un metal se calienta suficientemente, se vuelve rojo. En un sitio oscuro, el cuerpo se hace visible a una temperatura de 400°C. Si la temperatura sigue aumentando, el color del metal vuelve naranja, amarillo e incluso llega a ser azulado después de pasar por la emisión de blanco a unos 10.000°C. Un cuerpo opaco, sea metálico o no, irradia con esas características.

Cuando un cuerpo negro (que no refleja lo que viene de fuera) es calentado, emite una radiación en muchas longitudes de onda. Si medimos la intensidad de esa radiación en cada longitud de onda, se puede representar con una curva que se llama curva de Planck. En la figura 21 se presenta para diferentes temperaturas del cuerpo negro. Tiene un máximo en una determinada frecuencia, que nos da el color predominante. Esa $\lambda_{\text{máx}}$ se relaciona con

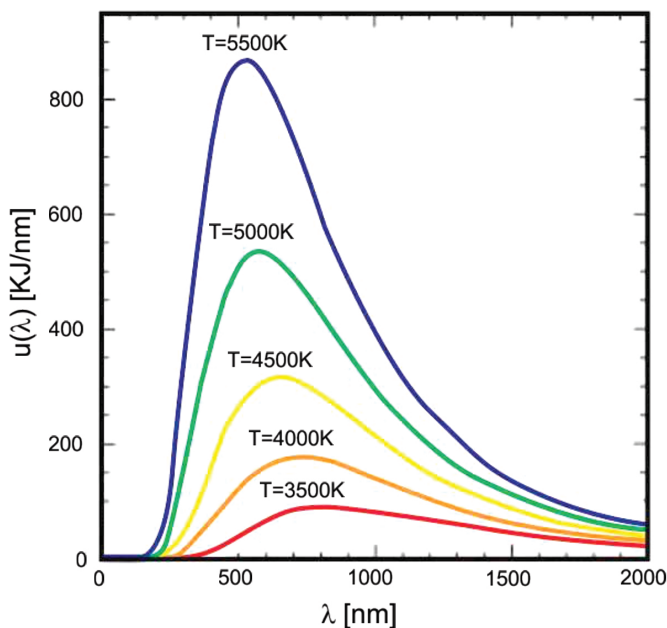


Fig. 21: Curvas de Planck de cuerpos negros a diferentes temperaturas.

la temperatura del cuerpo según la Ley de Wien:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} (\text{m})}{T}$$

donde T es la temperatura del cuerpo. Obsérvese que gracias a esta ley, estudiando la radiación que nos llega de un objeto lejano, podemos saber a qué temperatura está sin necesidad de ir hasta allí.

Ejemplos de objetos astronómicos opacos que pueden ser llamados cuerpos negros son las estre-

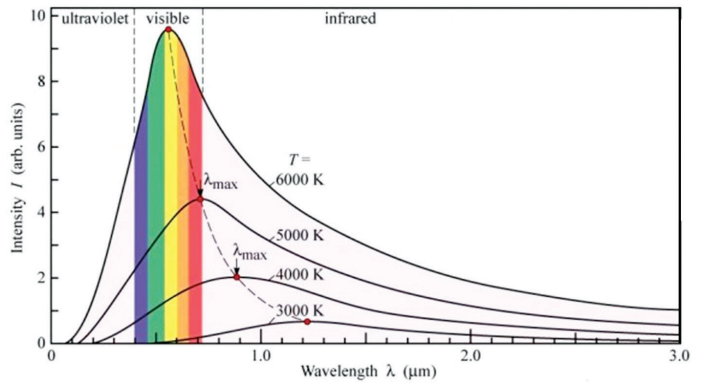


Fig. 22: Curva de emisión del "espectro continuo" del Sol.

llas (a excepción de su atmósfera y corona), los planetas, asteroides o la radiación de fondo cósmico de microondas.

La Ley de Wien es una ley general para la emisión térmica de los cuerpos opacos. Por ejemplo, el ser humano irradia en la región de infrarrojos con una emisión máxima a una longitud de onda de 9,4 μ, como dice la ley de Wien (considerando una temperatura de 37° C (=310 K)). Por eso los dispositivos de uso militar para observación nocturna utilizan esas longitudes de onda.

Volviendo al Sol, como su atmósfera es transparente, la radiación de cuerpo negro será determinada por la temperatura en la fotosfera, donde el Sol pasa a ser transparente (alrededor de 5800 K), por lo que su radiación de cuerpo negro debe tener un máximo de longitud de onda entorno a 500 nm, como se presenta en la figura 22.

Nuestra atmósfera absorbe la radiación infrarroja y ultravioleta. Curiosamente el ojo humano ha evolucionado para tener una visibilidad coherente con la parte visible de la luz solar que llega a la superficie de la Tierra.

Dispersión de la luz solar (scattering)

Cuando un rayo de luz blanca atraviesa un gas que contiene partículas de tamaño mayor que la longitud de onda, la luz no se separa y todas las longitudes de onda son dispersadas. Esto ocurre cuando la luz del Sol atraviesa una nube que contiene pequeñas gotitas de agua: esta se ve blanca. Lo mismo pasa cuando la luz atraviesa granos de sal o de azúcar.

Pero si la luz es dispersada por partículas de tamaño similar a la longitud de onda (colores) de unos determinados fotones, ellos son dispersados pero no el resto. Es la llamada dispersión o scattering.

En la atmósfera, la luz azul se dispersa mucho más

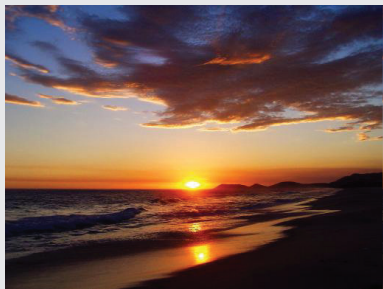


Fig. 23: El color del cielo depende de la dispersión de Rayleigh.

Actividad 6: Extinción y dispersión (scattering)

Este experimento se hace con un retroproyector (o cualquier otra fuente intensa de luz), una solución diluida de leche, un cartón negro y un vaso alto. Se debe preparar una solución de leche utilizando aproximadamente 1 gota de leche en 50 ml de agua (ese es el punto crucial por lo que hay que probar la concentración de la solución antes de la clase). El agua deberá parecer más un agua sucia con polvo blanco que parecer que contiene leche. Hay que recortar con una tijera un círculo en el cartón negro que se corresponda con la forma y dimensión de la base del vaso. Se pone el vaso vacío sobre la apertura y se conecta el retroproyector (figura 24a). La luz que llega a la pared será blanca.



Fig. 24a: En el inicio la luz que llega a la pared es blanca.



Fig. 24b: Con un poco de solución la luz que llega a la pared pasa a amarilla.



Fig. 24c: Cuando queda lleno la luz en la pared pasa a roja.

Vamos rellenando el vaso con la solución diluida de leche. La luz que llega a la pared queda cada vez más roja (figuras 24b y 24c). Por los lados del vaso sale una luz blanco-azulada.

Bibliografía:

- Broman, L, Estalella, R, Ros, R.M. Experimentos en Astronomía. Editorial Alhambra Longman S.A., Madrid, 1993.
- Costa, A, "Sunlight Spectra", 3rd EAAE Summer School Proceedings, Ed. Rosa Ros, Briey, 1999.
- Costa, A, "Simple Experiments with the Sun", 6th International Conference on Teaching Astronomy Proceedings, Ed. Rosa Ros, Vilanova i la Geltrú, Barcelona, 1999.
- Dale, A. O., Carrol, B. W, Modern Stellar Astrophysics, Addison-Wesley Publ. Comp., E.U.A, 1996.
- Ferreira, M., Almeida, G, Introdução à Astronomia e às Observações Astronómicas, Plátano Ed. Téc., Lisboa, 1996.
- Johnson, P.E., Canterna, R, Laboratory Experiments For Astronomy, Saunders College Publishing, Nova Iorque, 1987.
- Lang, K.R, Sun, Earth & Sky, Springer-Verlag, Heide-Iberga, 1995.
- Levy, D, Skywatching-The Ultimate Guide to the Universe, Harper Collins Publishers, London, 1995.
- Moreno, R. Experimentos para todas las edades, Editorial Rialp, Madrid, 2008.
- Rybicki, G.B., Lightman, A.P, Radiative Processes in Astrophysics, John Wiley & Sons, E.U.A, 1979.
- Sousa, A.S, Propriedades Físicas do Sol, Ed. ASTRO, Porto, 2000.
- Zeilik, M., Gregory, S.A., Smith, E.V.P, Introductory Astronomy and Astrophysics, 3rd Ed., Saunders Co-llege Publishing, Orlando, E.U.A, 1992.

Fuentes Internet

- NASA Polar Wind and Geotail Projects
<http://www-istp.gsfc.nasa.gov>.
- Space & astronomy experiments
<http://www.csiro.au/csiro/channel/pchdr.html>
- The Sun <http://www.astromia.com/solar/sol.htm>
- Nine planets
<http://www.astrored.net/nueveplanetas/solarsystem/sol.html>

Vida de las estrellas

Alexandre Costa, Beatriz García, Ricardo Moreno,
Rosa M Ros

International Astronomical Union, Escola Secundária de Loulé (Portugal), Universidad Tecnológica Nacional (Mendoza, Argentina), Colegio Retamar (Madrid, España), Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España).

Resumen

Para comprender la vida de las estrellas es necesario entender qué son, cómo podemos saber a qué distancia están, cómo evolucionan y cuáles son las diferencias entre ellas. A través de experimentos sencillos se puede enseñar a los alumnos el trabajo que hicieron los científicos para estudiar la composición de las estrellas, y también realizar algunos modelos simples.

Objetivos

Este taller complementa la conferencia general de evolución estelar de este libro presentando distintas actividades y demostraciones. Los principales objetivos son los siguientes:

- Entender la diferencia entre la magnitud aparente y magnitud absoluta.
- Entender el diagrama de Hertzsprung-Russell haciendo un diagrama color-magnitud.
- Comprender los conceptos, tales como supernova, estrella de neutrones, pulsares y agujero negro.

Actividad 1: Concepto de Paralaje

Un concepto que se usa para calcular distancias en astronomía es la paralaje. Vamos a realizar una actividad muy sencilla que nos permitirá entenderlo. Pongámonos frente a una pared a una cierta distancia, en la que haya puntos de referencia: armario, cuadros, puertas, etc. Estiramos el brazo frente a nosotros, y pongamos el dedo pulgar vertical (figuras 1a y 1b).

Si cerramos ahora el ojo derecho, veremos al dedo sobre, por ejemplo, el centro de un cuadro. Sin mover el dedo, abrimos el ojo derecho y cerramos el izquierdo. El dedo ahora aparece desplazado sobre el fondo: ya no coincide con el centro sino con el borde del cuadro.

Por esta razón, cuando observamos el cielo desde dos ciudades alejadas, los cuerpos cercanos, por ejemplo la Luna, aparecen desplazados respecto a las estrellas del fondo, que están muchísimo más lejanas. El desplazamiento es mayor cuanto más

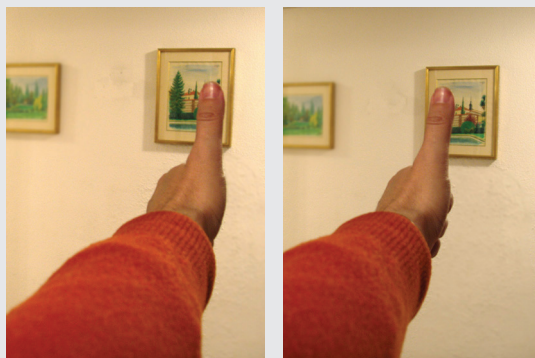


Fig. 1a: Con el brazo extendido miramos la posición del pulgar respecto al fondo, primero con el ojo izquierdo (cerrando el derecho) y después al revés, Fig. 1b, lo miramos con el ojo derecho (con el izquierdo cerrado).

separados estén los lugares desde donde se toman las observaciones. Esa distancia se llama línea de base.

Cálculo de distancias a las estrellas por Paralaje

Paralaje es el cambio aparente en la posición de un objeto, cuando se mira desde diferentes lugares. La posición de una estrella cercana sobre el fondo mucho más lejano parece cambiar cuando se ve desde dos ubicaciones diferentes. Así podemos

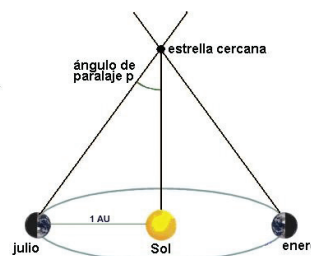


Fig. 2: El ángulo de paralaje p es el ángulo bajo el que se ve la distancia Tierra-Sol desde la estrella.

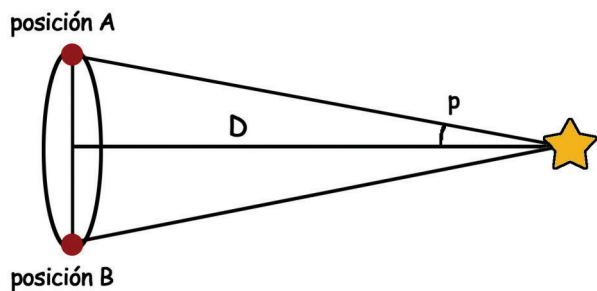


Fig. 3: Conocido el ángulo se puede calcular la distancia D al objeto.

determinar la distancia a las estrellas cercanas.

Para que la paralaje sea apreciable, se toma como distancia base la mayor posible, que es el diámetro de la órbita terrestre alrededor del Sol (figura 2).

Por ejemplo, si observamos una estrella próxima respecto al fondo estrellado, desde dos posiciones A y B de la órbita terrestre (figura 3), separadas por seis meses, podremos calcular la distancia D a la que se encuentra la estrella próxima, deduciendo:

$$\tan p = \frac{AB/2}{D}$$

Como p es un ángulo muy pequeño, su tangente se puede aproximar al ángulo medido en radianes:

$$D = \frac{AB/2}{p}$$

La base del triángulo AB/2 es la distancia Tierra-Sol, es decir 150 millones de km. Si tenemos el ángulo de paralaje p, la distancia a la estrella, en kilómetros será $D = 150\,000\,000/p$, con el ángulo p expresado en radianes. Por ejemplo, si el ángulo p es un segundo de arco, la distancia de la estrella será:

$$D = \frac{150\,000\,000}{2\pi/(360\,60\,60)} = 30939720937064 \text{ km} = 3,26 \text{ a.l.}$$

Esta es la unidad de distancia usada en la astronomía profesional. Si una estrella se viese con una paralaje de un segundo de arco, se diría que está a 1 parsec (pc), que equivale a $1\text{pc} = 3,26$ años luz. Cuanto más pequeño sea la paralaje, mayor es la distancia de la estrella. La relación entre distancia (en pc) y paralaje (en segundos de arco) es:

$$d = \frac{1}{p}$$

La sencillez de esta expresión es la razón por la que se usa tanto. Por ejemplo, la estrella más cercana es

Proxima Centauri, tiene una paralaje de $0,76''$, por lo que está a una distancia de 1,31 pc, que equivale a 4,28 a.l. La primera observación de paralaje de una estrella (61 Cygni) lo hizo Bessel en 1838. Aunque se sospechaba que las estrellas estaban muy lejanas, hasta entonces no se pudo medir con cierta precisión la distancia de las estrellas.

Actualmente, se usa la paralaje para medir distancias de estrellas que distan hasta unos 300 años luz. Más allá la paralaje es inapreciable, y hay que usar otros métodos, pero que se basan en general en comparar las estrellas lejanas con otras cuya distancia se sabe por paralaje. Por tanto es básico el concepto de paralaje en astronomía.

Actividad 2: Ley de la inversa del cuadrado

Un experimento sencillo sirve para comprender la relación entre la luminosidad, el brillo, y la distancia a la que está una fuente luminosa. Así se comprenderá que la magnitud es una función de la distancia. Como se muestra en el diagrama de la figura 4, vamos a utilizar una bombilla de luz, y en un lado de la bombilla se sitúa una cartulina con una abertura cuadrada. La luz de la bombilla se extiende en todas direcciones. Una cierta cantidad de luz pasa a través de la abertura e incide en una pantalla móvil colocada paralela a la cartulina. La cantidad total de luz que pasa a través de la abertura y que llega a la pantalla, no depende de dónde ponemos la pantalla. Pero a medida que situamos la pantalla más

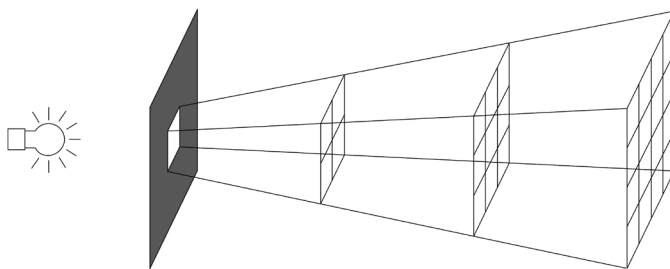


Fig. 4: Fundamento del experimento

lejos, esta cantidad fija de luz debe cubrir un área más grande, y consecuentemente el brillo sobre la pantalla disminuye. Para tener una fuente puntual y disminuir las sombras en los bordes del cuadrado de luz se puede utilizar una tercera cartulina con un agujero próxima de la bombilla (no se puede usar demasiado tiempo porque podría arder).

Se observa que cuando la distancia pasa a ser el doble, el área sobre el cual incide luz pasa a ser cuatro veces mayor, luego la intensidad luminosa (la luz que llega por unidad de área) pasará a ser un

cuarto. Si la distancia se triplica, el área sobre el cual incide la luz pasa a ser nueve veces mayor, luego la intensidad luminosa pasará a ser un noveno. Así, se puede decir que la intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la fuente, o mejor, se puede decir que es inversamente proporcional al área total que la radiación atraviesa, que es una esfera de área $4\pi D^2$.

El sistema de magnitudes

Imaginemos una estrella como una bombilla encendida. El brillo con la que la vemos depende de su luminosidad y de la distancia desde donde la veamos. Eso se puede comprobar poniendo una hoja de papel frente a la bombilla: la cantidad de luz que le llega dependerá de la potencia de la bombilla, y de la distancia de la hoja a la bombilla. La luz de la bombilla se tiene que repartir entre la superficie de una esfera, que es $4\pi R^2$. Por eso, si duplicamos la distancia de la hoja de papel a la bombilla (figura 5), la intensidad que le llega no es la mitad, sino la cuarta parte (el área de la esfera entre al que hay que repartir la luz es cuatro veces mayor). Y si la distancia se triplica, la intensidad que le llega es la novena parte (el área de la esfera entre al que hay que repartir la luz es nueve veces mayor).

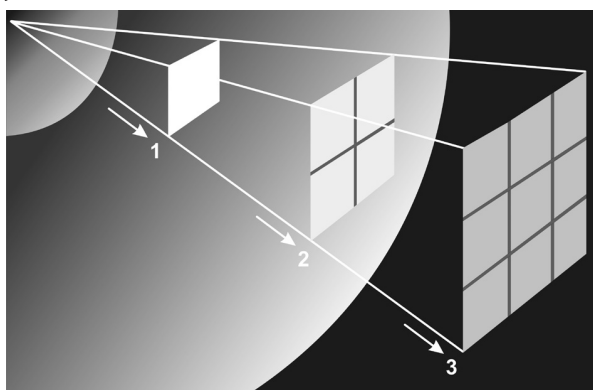


Fig. 5: La luz llega con menos intensidad cuanto más alejado se está.

Podríamos definir el brillo de una estrella como la intensidad (o flujo) de energía que llega a un papel de un metro cuadrado situado en la Tierra (figura 5). Si la luminosidad (o potencia) de la estrella es L , entonces:

$$B = F = \frac{L}{4\pi D^2}$$

Pero como depende de la luminosidad y de la distancia, podemos ver con igual brillo una estrella pequeña cercana y otra más luminosa y lejana.

Hiparco de Samos, en el siglo II a.C., hizo el primer catálogo de estrellas. Clasificó a las más brillantes

como de 1ª magnitud y las más débiles, de 6ª. Así inventó un sistema de división de brillos de las estrellas que aún está vigente hoy, aunque ligera-mente retocado con medidas más precisas que las realizadas a simple vista.

Una estrella de magnitud 2 es más brillante que otra de magnitud 3. Las hay incluso de magnitud 0 y de magnitud negativa, como Sirio, que tiene magnitud -1,5. Prolongando la escala, Venus llega a adquirir magnitud -4, la Luna llena -13, y el Sol -26,8. Esos valores son llamados propiamente magnitudes aparentes m , ya que miden el brillo que aparentan tener las estrellas vistas desde la Tierra. Se adoptó la regla de que una estrella de magnitud 1 es 2,51 veces más brillante que otra de magnitud 2, ésta 2,51 veces más que otra de magnitud 3, etc. Esto hace que una diferencia de 5 magnitudes sea equivalente a $2,51^5 = 100$ veces más brillo. Esta relación matemática puede expresarse así:

$$\frac{B_1}{B_2} = (2,51^{m_2 - m_1})$$

o la equivalente,

$$m_2 - m_1 = 2,5 \log\left(\frac{B_1}{B_2}\right)$$

La magnitud aparente m de una estrella es una medida que está relacionada con el flujo F de energía (medible con un fotómetro, y equivalente al brillo B) que llega a los telescopios desde una estrella y de una constante que depende de las unidades de flujo y de la banda de observación C :

$$m = -2,5 \log F + C$$

La expresión anterior permite verificar que cuanto mayor sea el flujo, más negativa será la magnitud. Otro concepto más interesante es el de magnitud absoluta M : es la magnitud aparente m que tendría una estrella si estuviera a una distancia de 10 parsecs. Con la magnitud absoluta M podemos comparar los "brillos reales" de dos estrellas o lo que es equivalente, su potencia o luminosidad.

Para convertir la magnitud aparente en magnitud



Fig. 6: Tipos espectrales de estrellas, según los colores.

absoluta es necesario conocer la distancia a la estrella y ese es uno de los mayores problemas, pues las distancias en astronomía suelen ser difíciles de determinar. Sin embargo si uno sabe la distancia en parsecs (d) a la estrella puede obtener la magnitud absoluta (M) a través de la ecuación:

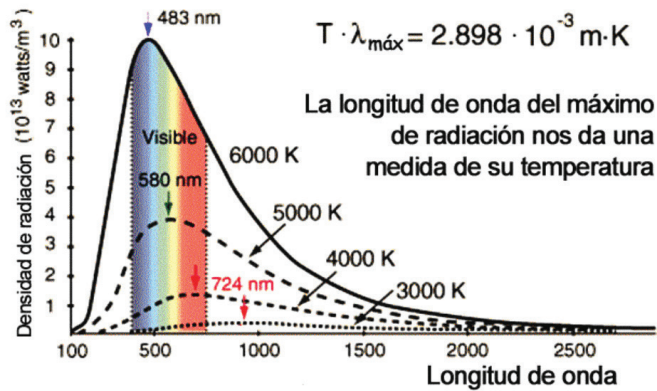


Fig. 7: Según aumenta la temperatura de la estrella, el máximo se desplaza del rojo hacia el azul.

$$M = m - 5 \log d + 5$$

Los colores de las estrellas

Es un hecho que las estrellas presentan diversos colores. A simple vista se distinguen variaciones entre ellas, pero todavía más con prismáticos y con fotografía. Los tipos de estrellas según sus colores se llaman tipos espectrales, y son: O, B, A, F, G, K, M. (figura 6).

De acuerdo con ley de Wien (figura 7), al analizar la luz que nos llega de una estrella, el máximo de la intensidad de la emisión es más azul cuanto mayor sea la temperatura, y más rojo cuanto más fría. Dicho de otra forma, el color de la estrella nos indica la temperatura de su superficie.

Actividad 3: Colores de las estrellas

Los estudiantes pueden entender el color de las estrellas utilizando un aparato similar al presenta-

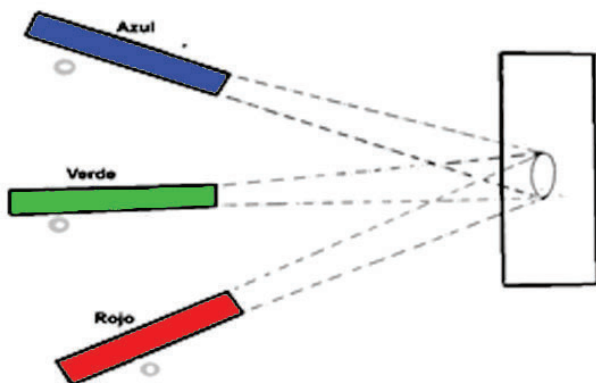


Fig. 8a: Esquema del aparato para explicar el color de las estrellas.

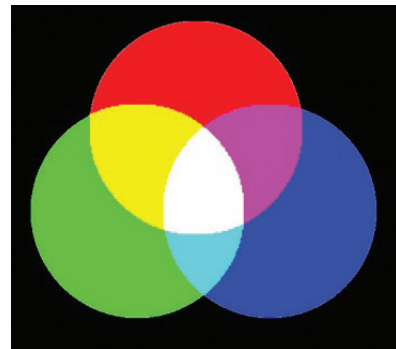


Fig. 8b: Aspecto de la proyección para explicar la luz de color blanco.

do esquemáticamente en la figura 8a. Son tres linternas a las que se ha quitado el espejo parabólico que tienen junto a la bombilla, se les ha puesto un tubo de cartulina negra con un filtro en el extremo de celofán de color azul en una, verde en otra y rojo en la tercera.

Podemos analizar la figura 8b e intentar reproducir el aumento de la temperatura de las estrellas. Para bajas temperaturas la estrella solamente tiene rojo. Si la temperatura aumenta habrá también emisión en el verde, y la estrella va a pasar por el naranja y el amarillo. A partir de ahí son importantes las longitudes de onda azules y la estrella va pasando

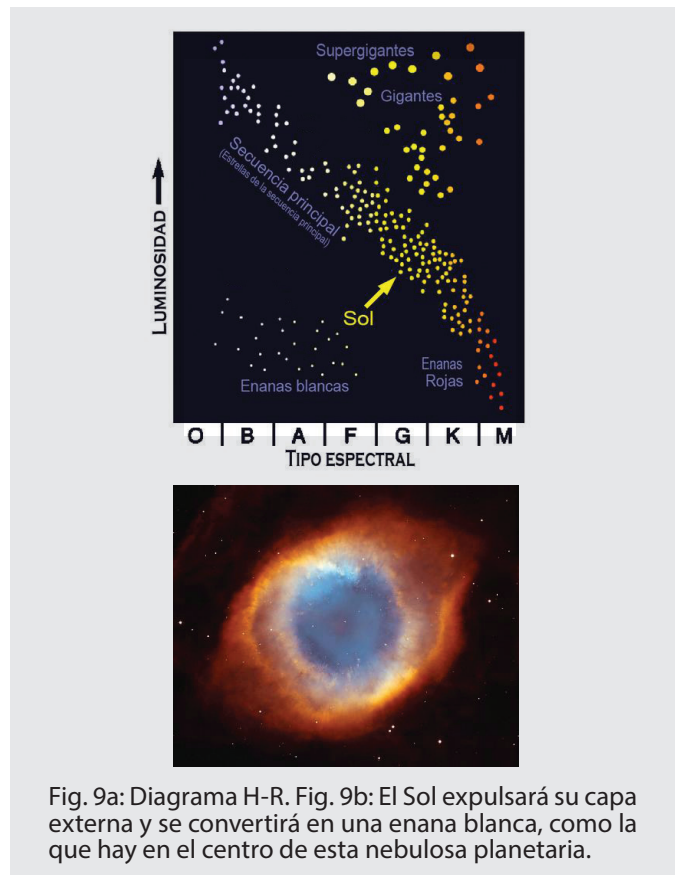


Fig. 9a: Diagrama H-R. Fig. 9b: El Sol expulsará su capa externa y se convertirá en una enana blanca, como la que hay en el centro de esta nebulosa planetaria.

a ser blanca. Si la intensidad de las longitudes de onda del azul es mayor que las intensidades de las longitudes de onda del rojo y del verde la estrella pasa a ser azulada. Para demostrar ese último paso será necesario alejar el rojo y el verde para reducir

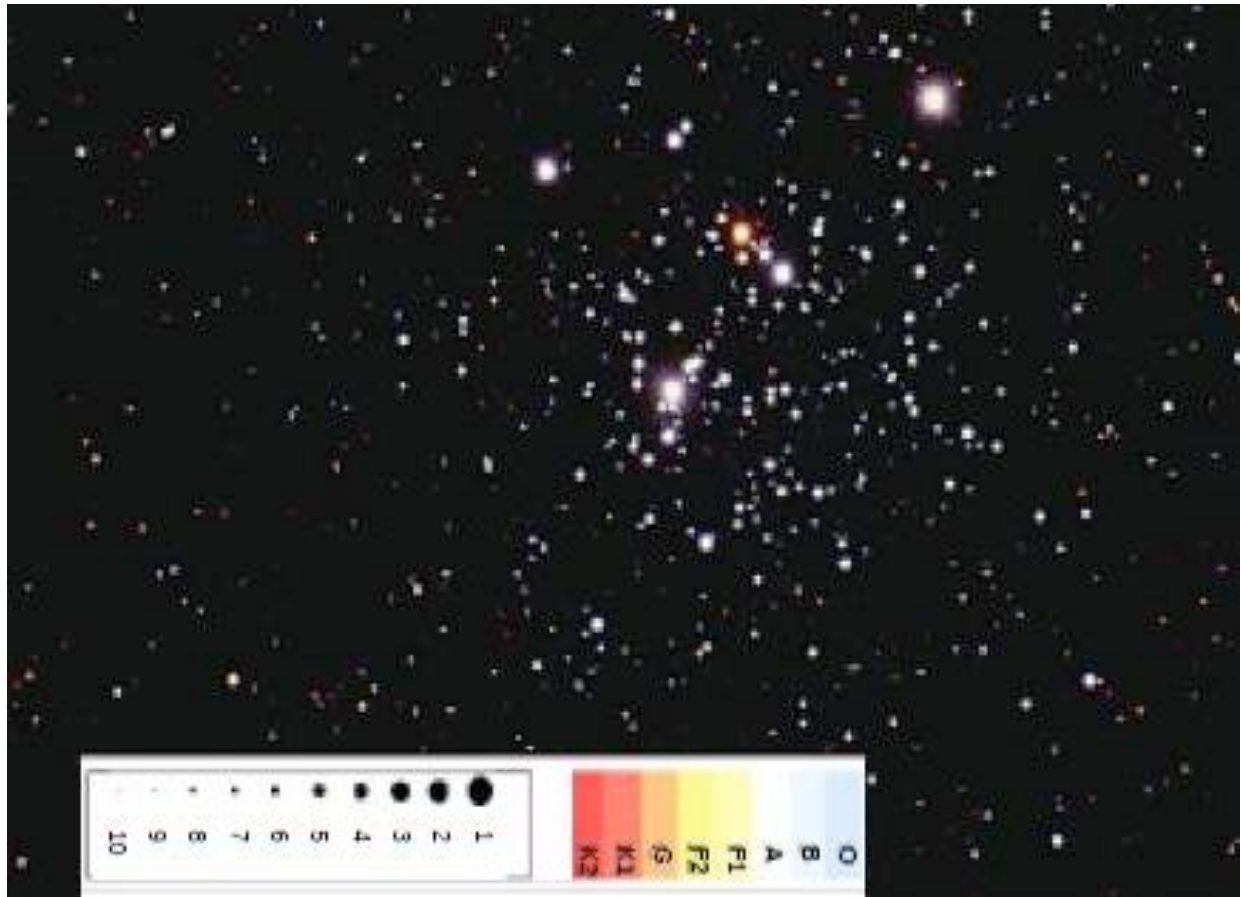


Fig. 10: Imagen de la Caja de Joyas

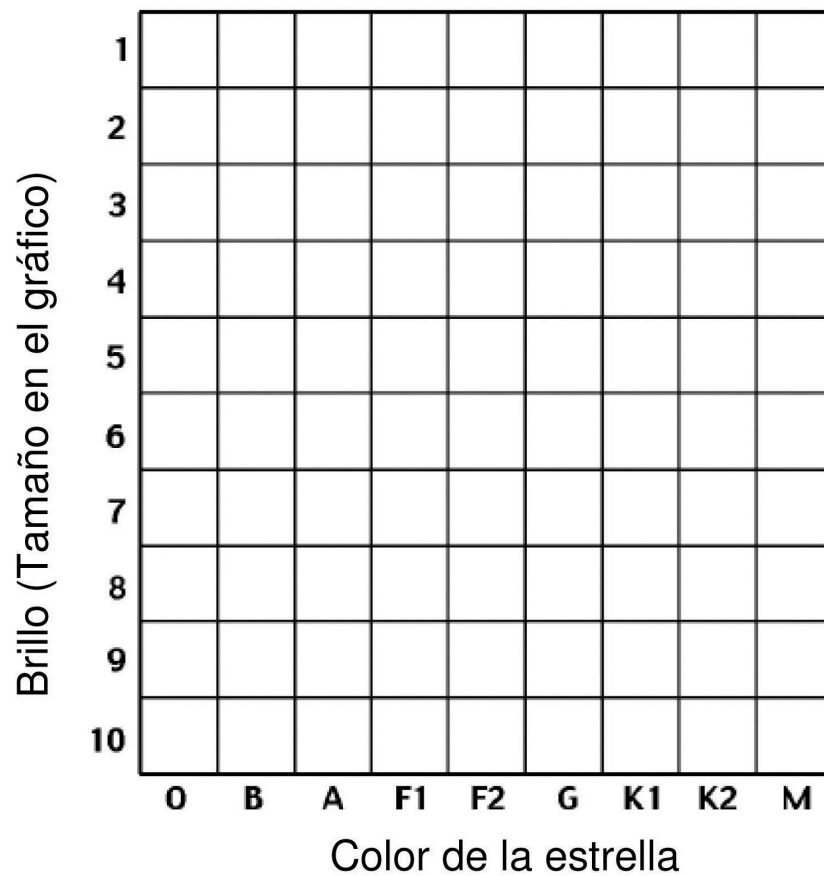


Fig. 11: Hoja de Trabajo

su intensidad para producir el blanco.

Cómo sabemos que las estrellas evolucionan

Las estrellas se pueden agrupar en una diagrama de Hertzsprung-Russell (figura 9a). Las estrellas frías tendrán poca luminosidad (abajo a la derecha), las muy calientes tendrán mucha luminosidad (arriba a la izquierda). Si tiene mucha temperatura y poca luminosidad es que son enanas blancas. Si tienen poca temperatura y mucha luminosidad es que son supergigantes.

Con el tiempo, una estrella puede evolucionar y "moverse" en el diagrama H-R. Por ejemplo, el Sol (en el centro) al final de su vida se hinchará y pasará ser una gigante roja, luego expulsará la capa externa y se convertirá en una enana blanca, como la de la figura 9b.

Actividad 4: La edad de los cúmulos abiertos

Examina la fotografía de la figura 10, de la Caja de Joyas, o Kappa Crucis, en la constelación de la Cruz del Sur. Está claro que no todas las estrellas son del mismo color y es difícil decidir donde acaba el cúmulo de estrellas. Sobre la figura 10, marca el sitio en donde crees que el cúmulo termina o está su límite.

En la misma figura 10, indica con una "X" el lugar donde crees que se encuentra el centro del cúmulo estelar y utiliza una regla para medir y dibujar un cuadrado de 4 cm de lado entorno ese centro. Mide el brillo de la estrella más cercana a la esquina superior izquierda de tu cuadrado, a partir de su

tamaño comparándolo con los puntos de comparación en la guía en el margen de la figura 10. Estima el color de la estrella con ayuda de la guía de colores de comparación situado en el margen de la figura 10. Ubica esta estrella, dibujando un punto, en la plantilla gráfica de la figura 11, donde están indicados color y magnitud como abscisa y ordenada, respectivamente, el color y la magnitud de tu primera estrella. Indica la estrella que ya dibujaste en la figura 10 y procede a medir color y brillo de todas las estrellas dentro del cuadrado de 4 cm.

Las estrellas de la Caja de Joyas aparecen en el gráfico ajustándose aproximadamente a una cierta estructura. La mayor parte de ellas ocupan una banda que va desde el extremo superior izquierdo en el gráfico hasta el extremo inferior derecho. En la imagen de la figura 10, también aparecen estrellas que se encuentran delante y atrás del cúmulo abierto y no son parte de él. Los astrónomos llaman a esas estrellas "estrellas de campo". Si tienes tiempo, trata de estimar cuántas estrellas de campo has incluido en el cuadrado de 4 cm de lado y estima su color y brillo. Ubica las estrellas de campo en el diagrama color-magnitud, indicándolas con una x minúscula, en lugar de un punto. Observa que las estrellas de campo se distribuyen en el gráfico más o menos al azar, no parecen formar ninguna estructura.

Las estrellas menos masivas son más frías (rojas). Las estrellas más masivas son calientes (azules) y brillantes. Esta "banda" formada por estrellas se denomina "secuencia principal". A estas estrellas se las clasifica desde O (las más brillantes, más masivas y de mayor temperatura: alrededor de 40.000 K) hasta M (las menos brillantes, de poca masa y de

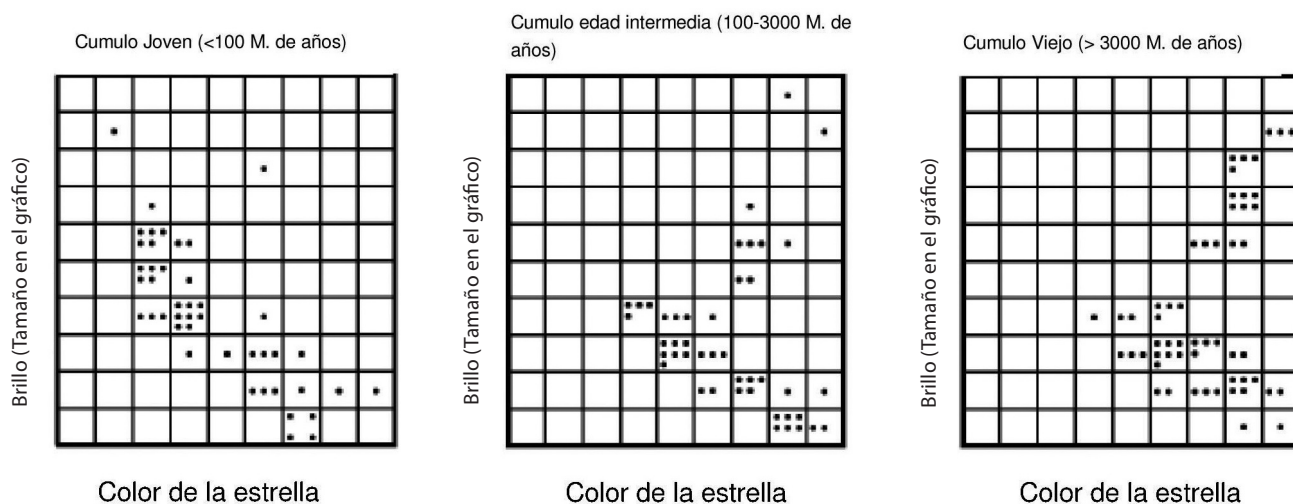


Fig. 12a, 12b y 12c: Cúmulos de comparación

muy baja temperatura: unos 3500 K).

Las estrellas permanecen estables un período importante de sus vidas. Durante el mismo, la gravedad fuerza a la estrella hacia el colapso, y las fuerzas internas, asociadas con la producción de energía, producen una presión que trata de compensar ese colapso. Cuando las estrellas envejecen, el equilibrio entre atracción gravitatoria y presión de radiación se pierde, esto lleva a la estrella hacia su muerte.

El límite entre la vida y la muerte de una estrella, es una parte de su ciclo, un estado denominado de "gigante roja". Las gigantes rojas son brillantes porque tienen un diámetro que es entre 10 y más de 300 veces el del Sol y se las ve rojas porque son frías. Se las clasifica como estrellas K o M en la hoja de trabajo, pero son muy brillantes. Las estrellas más masivas, agotan su combustible muy rápido y son las primeras que abandonan la secuencia principal para transformarse en gigantes rojas. Por su enorme dimensión, que puede ser del orden de 1000 veces la del Sol en diámetro, las gigantes rojas de las estrellas con masas comprendidas entre 10 y 50 masas solares, son llamadas "supergigantes rojas" (hipergigantes rojas en el caso de las que tuvieran origen en una estrella de clase O). Se expanden y enfrían, volviéndose brillantes y rojas y se mueven hacia la región superior derecha del diagrama. A medida que el cúmulo se hace más y más viejo, mayor cantidad de estrellas abandonarán la secuencia principal para transformarse en gigantes

rojas. Los astrónomos afirman que la edad del cúmulo puede determinarse por el color de la estrella más brillante, la más masiva, que aún permanece en la secuencia principal.

Muchas estrellas de cúmulos viejos han evolucionado mas allá de la secuencia de gigantes rojas, a otro estado denominado enanas blancas. Pero las enanas blancas son muy pequeñas, del tamaño de la Tierra y muy débiles y por eso no podemos verlas en esta imagen de la caja de Joyas.

¿Puedes, finalmente, estimar la edad del cúmulo abierto La Caja de Joyas (figura 10) utilizando el juego de gráficos de las figuras 12a, 12b y 12c, comparándolos con el tuyo propio?

Conociendo el diagrama HR y sabiendo que en él se relacionan el color (o temperatura superficial) con el brillo (o luminosidad) de las estrellas y que ambos factores pueden estar relacionados con la edad, es posible explicar el grado de evolución de los cúmulos que se proveen y comparar las vidas relativas de las estrellas O/B con las A/F/G y las K/M, pues se puede advertir que según sea la masa de las estrellas, éstas evolucionarán en el mismo tiempo, la edad del cúmulo, de manera diferente. De esta manera se comprende que la tabla izquierda de la figura 12c corresponde a un cúmulo joven (tiene estrellas O/B en la secuencia principal, y sabemos que las O/B evolucionan y abandonan esta región muy rápido) y la tabla de la derecha corresponde a uno viejo (con estrellas K/M en secuencia principal,

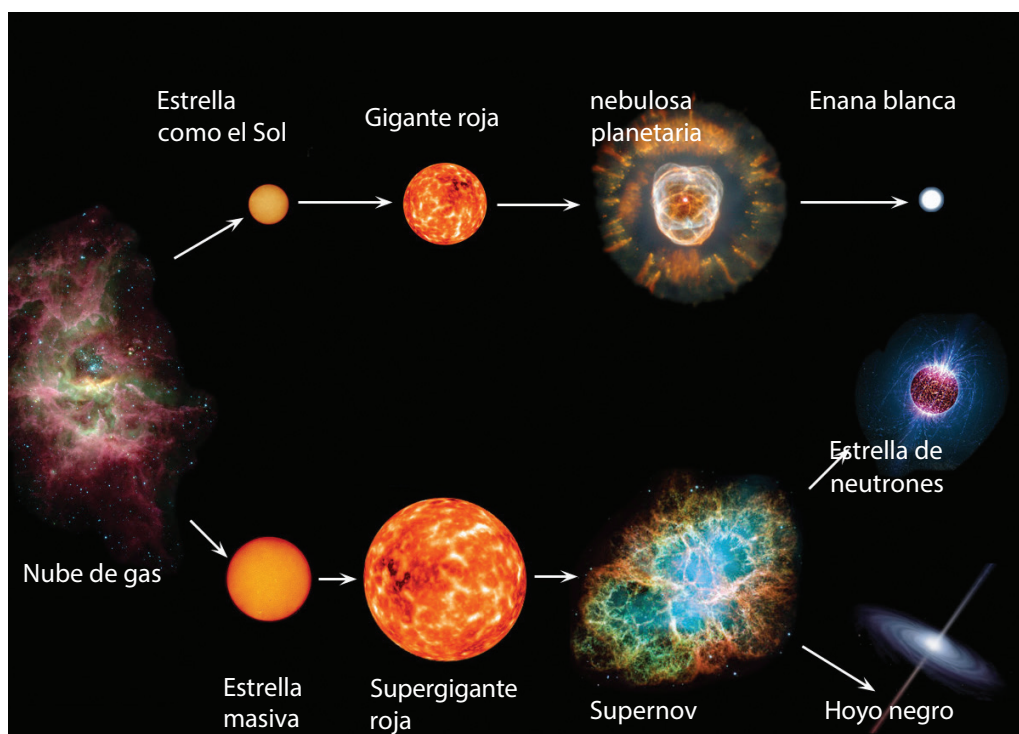


Fig 13: Evolución de las estrellas según su masa.

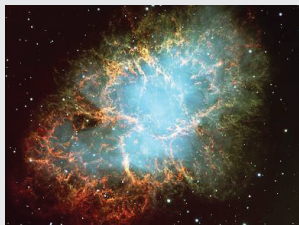


Fig. 14a: Restos de una supernova.

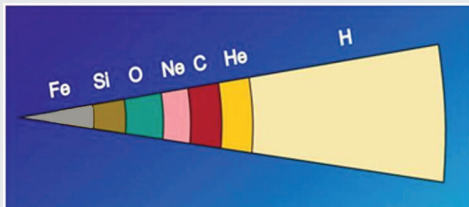


Fig. 14b: Estructura en capas del interior de una estrella antes de explotar como una supernova.

pero con las estrellas más masivas evolucionadas). Cabría preguntarnos: ¿Cuál sería el lugar que le correspondería al Sol en el diagrama HR? El Sol, una estrella con temperatura superficial de 5870°K, produce el máximo de radiación en torno del color amarillo, correspondería al tipo G2 (abscisas), mientras que su estado evolutivo es aquel en donde se esta fusionando el hidrógeno en su núcleo para transformarse en helio, es decir, la secuencia principal, clase de luminosidad V, la región de mayor concentración de estrellas en el diagrama HR.

Muerte de las estrellas

El final de una estrella depende de la masa de la nebulosa inicial, como se ve en la figura 13:

En un determinado momento de la evolución de los cúmulos estelares, las estrellas de mayor masa desaparecen del diagrama de Hertzsprung-Russell. Mientras que las más pequeñas van a originar enanas blancas, las mayores van a dar origen a uno de los más violentos fenómenos del Universo: una supernova. Los residuos que sobran (púlsares y agujeros negros) van a ser objetos que no tiene emisión térmica y por eso no son visibles en el Diagrama de Hertzsprung Russell.

¿Qué es una supernova?

Es la muerte de una estrella muy masiva. La estrella empieza por la fusión del hidrógeno para producir helio, pasando después a la producción de carbono y así sucesivamente produciendo elementos cada vez más pesados. El producto final es el hierro, cuya fusión no es posible porque en lugar de expulsar energía tendría que absorberla.

Las diferentes igniciones se producen siempre en el centro, cuando todavía queda material en la

periferia, por lo que la estrella va adoptando una estructura en capas, llamada estructura de cebolla (figura 14b), con elementos más pesados según vamos profundizando.

Una estrella de 20 masas solares dura:

- 10 millones de años quemando hidrógeno en su núcleo (secuencia principal)
- 1 millón de años quemando el helio
- 300 años el carbono
- 200 días el oxígeno
- 2 días en consumir el silicio: la explosión de la supernova es inminente.

Cuando sólo hay hierro en el centro, no son posibles más reacciones nucleares y sin la presión de radiación la estrella tiene un inevitable colapso gravitatorio sobre sí misma, pero esta vez sin posibili-



Fig. 15: Dejamos caer a la vez una pelota de baloncesto y una de tenis.

dad de encender ya nada. En esa caída los núcleos atómicos y los electrones se van juntando formando en el interior neutrones que se apilan. En ese momento, toda la parte central de la estrella consiste en neutrones en contacto unos con otros, con una densidad tal que una cucharadita pesaría tanto como todos los edificios de una gran ciudad juntos. Y como los neutrones están en contacto unos con otros, la materia no puede contraerse más y la caída a velocidades del orden de la cuarta parte de la velocidad de la luz se detiene de golpe, produciendo un rebote hacia atrás en forma de onda de choque que es uno de los procesos más energéticos que se conoce en el Universo (figura 14a): una sola estrella en explosión puede brillar más que una galaxia entera, compuesta por miles de millones de estrellas. En ese rebote se producen los elementos más pesados que el hierro, como el plomo, el oro, el uranio, etc., que salen violentamente despedidos junto con toda la parte externa de la estrella. En el

interior queda una estrella de neutrones girando a gran velocidad, o un agujero negro.

Actividad 5: Simulación de la explosión de una supernova

Cuando una estrella estalla como supernova, los átomos ligeros de las capas externas caen sobre átomos más pesados del interior, y estos rebotan en el macizo núcleo de central.

Un modelo simplificado para el rebote de los átomos pesados contra el núcleo macizo, y el de éstos contra los más ligeros que vienen detrás cayendo desde las capas superficiales de esa gigantesca cebolla (figura 14b), se puede representar de forma fácil y un tanto espectacular con un balón de baloncesto y una pelota de tenis, dejándolos caer juntos sobre un terreno duro (figura 15).

En este modelo, el suelo representa el núcleo macizo de la estrella de neutrones, el balón de baloncesto sería un átomo pesado que rebota, y a su vez empuja al átomo ligero que viene detrás de él, representado por la bola de tenis.

Para realizar el modelo, se sitúa el balón de baloncesto a la altura de nuestros ojos, sobre él la pelota de tenis, lo más vertical posible y se dejan caer las dos a la vez. Si previamente se le pregunta a alguien la altura a la que cree que llegarán después del rebote, probablemente nos diga que a la inicial, o incluso un poco menos por los rozamientos. Sin embargo el resultado es muy diferente.

Al soltarlas, llegan casi al mismo tiempo al suelo. El balón grande rebota elásticamente, y retrocede prácticamente con la misma velocidad que ha llegado. En ese momento choca con la pequeña pelota de tenis, que baja con la misma velocidad con la que el balón sube y la pequeña sale despedida a gran velocidad hacia arriba, y llega mucho más alto. Si estos choques se repitiesen con más pelotas, cada vez más ligeras, que cayesen en la misma dirección, las velocidades que se conseguirían serían fantásticas.

En la práctica la pelota pequeña llega a sobrepasar el doble de la altura a la que se dejan caer las dos. De hecho si se hace en una habitación, hay que tener cuidado para que no dé en la lámpara del techo o en algún otro objeto delicado.

Este experimento se puede hacer en clase o en otro lugar cerrado, aunque es preferible hacerlo al aire libre. Se podría hacer desde una ventana alta, pero



Fig. 16: Un pulsar es una estrella de neutrones en rotación.

es difícil que la pelota de tenis caiga perfectamente vertical, por lo que saldrá despedida con gran fuerza en una dirección imprevisible, pudiendo producir roturas en objetos cercanos.

En algunas jugueterías o tiendas de Museos de la Ciencia venden un juguete llamado “Astro Blaster”, basado en los mismos principios. Se compone de cuatro pequeñas bolas de goma, de distinto tamaño, unidas por un eje, la última de las cuales sale disparada al rebotar en el suelo.

¿Qué es una estrella de neutrones?

Es el cadáver de una estrella muy grande, que ha colapsado, y se ha desprendido de su corteza en una explosión de supernova. No suele ser mucho mayor que algunas decenas de kilómetros y está formada por neutrones apilados uno junto a otro, con una densidad increíble: un simple dedal de esta materia pesaría millones de toneladas.

Si el remanente tiene más de 1.44 masas solares y hasta cerca de 8 masas solares, entonces se puede formar una estrella de neutrones.

¿Qué es un pulsar?

Es una estrella de neutrones que gira con extraordinaria rapidez (figura 16). Como es el final de una estrella grande, su materia, al concentrarse, aumenta su velocidad de giro, igual que un patinador que recoge sus brazos.

El campo magnético de la estrella crea unas fuertes emisiones electromagnéticas. Pero como el campo magnético no suele coincidir con el eje de giro — igual que pasa en la Tierra — esa emisión gira como un gigantesco faro cósmico. Si el chorro de emisión barre la Tierra, detectamos unas pulsaciones a un ritmo muy regular.



Fig. 17a:
Montaje

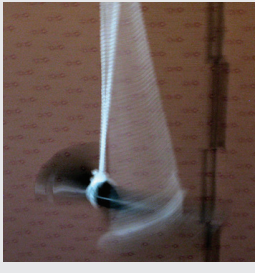


Fig. 17b: Giramos
la linterna

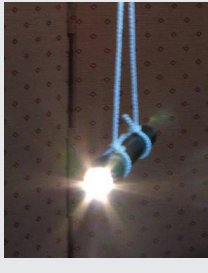


Fig. 17c: Vemos
su luz de forma
intermitente

En 1967 Hewish y Bell descubrieron el primer pulsar, en un punto donde no se observaba nada en luz visible. Lo llamativo era la rápida repetición de pulsos, varias veces por segundo, con una precisión asombrosa.

Durante un tiempo se pensó que eran señales de extraterrestres inteligentes. Luego se descubrieron más radiofuentes pulsantes, entre otras la del centro de la nebulosa del Cangrejo, producida por una supernova, y se pudo explicar su procedencia. El pulsar PSR B1937+21 es uno de los pulsares más rápidos conocidos gira más de 600 veces por segundo. Tiene cerca de 5 km de diámetro y si girase sólo un 10% más rápido, se rompería por la fuerza centrífuga.

Otro muy interesante es el sistema binario, llamado PSR 1913+16, en la constelación de Águila. El movimiento orbital mutuo en unos campos gravitatorios tan intensos produce unos pequeños retrasos en las emisiones que recibimos. Hulse y Taylor los han estudiado y confirman muchos postulados de la teoría de la relatividad, entre otros la emisión de ondas gravitacionales. Estos dos americanos recibieron el Premio Nobel en 1993 por esos estudios.

Actividad 6: Simulación de un pulsar

Un pulsar es una estrella de neutrones, muy maciza, que gira muy rápidamente. Emite radiación, pero la fuente no está totalmente alineada con el eje de giro, por lo que la emisión da vueltas como un faro de la costa. Si está orientado hacia la Tierra, lo que vemos es una radiación que pulsa varias veces por segundo, y la llamamos pulsar.

Podemos simularlo con una linterna (figura 17a) atada con una cuerda al techo. Si la encendemos y la hacemos girar (figura 17b), veremos la luz de forma intermitente cada vez que la linterna apunta en nuestra dirección (figura 17c).

Podemos inclinar un poco la linterna para que no

esté horizontal. Al girar, desde nuestra posición ya no vemos la luz. Sólo la vemos si estamos bien alineados con el giro del pulsar.

¿Qué es un agujero negro?

Si lanzamos una piedra hacia arriba, la fuerza de la gravedad va frenándola hasta que regresa de nuevo a nosotros. Si la velocidad con la que la lanzamos es mayor, conseguimos alturas elevadas, y si es 11 km/s, velocidad de escape de nuestro planeta, conseguiríamos que no volviera a caer.



Fig. 18: La trayectoria de la bola de tenis no es en línea recta sino una curva

Si la Tierra se contrajera manteniendo su masa, la velocidad de escape en su superficie sería mayor, ya que estaríamos más cerca del centro de la Tierra. Si se concentrara hasta un radio de 0,8 cm, la velocidad de escape sería algo mayor que la de la luz. Como nada puede sobrepasar esa velocidad, nada escaparía de su superficie, ni siquiera la luz. Se habría convertido en un agujero negro del tamaño de una canica.

Teóricamente puede haber agujeros negros de masas muy pequeñas, sin embargo sólo conocemos un mecanismo para que la masa se concentre tanto: el colapso gravitatorio, y para eso se necesitan masas muy grandes. Ya hemos visto la formación de estrellas de neutrones como cadáveres de estrellas de 1.44 masas solares hasta cerca de 8 masas solares, pero si la estrella originaria es aún mayor, la gravedad es tal que su interior se colapsa sobre sí misma disminuyendo aún más su volumen y transformándose en un agujero negro. Por eso, un primer tipo de agujeros negros conocidos tienen masas mayores que varias veces nuestro Sol. Su densidad es impresionante. Una canica hecha de su materia pesaría como toda la Tierra.

Aunque no se ven, se han detectado diversos candidatos a agujeros negros en el Universo gracias a otros objetos visibles que giran en su órbita a gran velocidad. Por ejemplo, justo en el centro de nuestra galaxia no vemos nada, pero sí detectamos un anillo de gases que giran a su alrededor a grandísimas velocidades. Ello necesita en su centro una gigantesca masa de tres o cuatro millones de soles,

que sólo puede ser un agujero negro de radio algo mayor que nuestro Sol. Ese es otro tipo de agujeros negros, que están situados en el centro de muchas galaxias.

Actividad 7: Simulación de la curvatura del espacio y de un agujero negro

Es muy sencillo simular la curvatura del espacio determinada por un agujero negro usando un pedazo de tejido elástico: licra (figura 18), o también la malla que venden en farmacias para fijar apósitos sobre el cuerpo humano.

Extendemos la tela o la malla. Lanzamos rodando una pelota más ligera (o una canica), y vemos que su trayectoria simula la trayectoria rectilínea de un rayo de luz. Pero si colocamos una pelota pesada (p.ej. un globo lleno de agua) o una bola de hierro en el centro de la tela y lanzamos rodando la pelota (o la canica), su trayectoria seguirá una curva en la tela, simulando la trayectoria de un rayo de luz que ya no sigue una línea recta como antes. El grado de esta desviación depende de lo cerca que pase el rayo de luz del cuerpo central y de lo masivo que sea este. El ángulo de desviación es directamente proporcional a la masa e inversamente proporcional a la distancia. Si aflojamos un poco la tensión de la tela, se produce una especie de pozo gravitacional, del cual es difícil que salga la bola ligera. Sería un modelo de agujero negro.

.....

Bibliografía

- Broman, L., Estalella, R. Ros. R.M, Experimentos en Astronomía, Ed. Alhambra Longman, Madrid, 1993.
- Dale, A. O., Carrol, B.W, Modern Stellar Astrophysics, Addison-Wesley Publ. Comp., E.U.A, 1996.
- Moreno, R, Experimentos para todas las edades, Ed. Rialp. Madrid, 2008.
- Pasachoff, J. M, Astronomy: From the Earth to the Universe, 4th Edition, Saunders College Publishing, E.U.A, 1995.
- Rybicki, G. B., Lightman, A.P, Radiative Processes in Astrophysics, John Wiley & Sons, E.U.A, 1979.
- Zeilik, M. Astronomy -The Evolving Universe, 8th Ed, John Willey & Sons, USA 1997.

Astronomía fuera de lo visible

Beatriz García, Ricardo Moreno, Rosa M. Ros

International Astronomical Union, Universidad Tecnológica Nacional (Mendoza, Argentina),
Colegio Retamar (Madrid, España), Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España).

Resumen

Los objetos celestes irradian en muchas longitudes de onda del espectro electromagnético, pero el ojo humano sólo distingue una parte muy pequeña de él: la región del visible. Hay formas de demostrar la existencia de formas de radiación electromagnética que no vemos, mediante experimentos sencillos. En esta presentación será posible introducirse en aquellas observaciones más allá de lo que es observable a simple vista o con un telescopio que puede usarse en una escuela de primaria o secundaria.

Objetivos

Esta actividad pretende mostrar ciertos fenómenos más allá de lo que puede ser observable con un telescopio de aficionado como son la existencia de:

- Energía electromagnética en la que los cuerpos celestes emiten y que nuestro ojo no puede detectar. Por esa razón, con sólo la parte visible del espectro no tenemos una imagen total del Universo.
- Emisiones no visibles en las regiones de las ondas de radio, infrarrojo, ultravioleta, microondas y rayos X.

Espectro electromagnético

Las ondas electromagnéticas cubren una amplia gama de frecuencias o de longitudes de ondas y pueden clasificarse según su principal fuente de producción. La clasificación no tiene límites precisos. El conjunto de todas las longitudes de onda se llama espectro electromagnético.

En la figura 1 se muestran las distintas regiones del espectro, con sus diferentes longitudes de onda. Se indica el tamaño entre las crestas de la onda (longitud de onda λ) y algunos objetos de esos tamaños: átomos, moscas, montañas... para hacernos una idea de las dimensiones de las ondas.

En la misma figura es posible apreciar cómo se

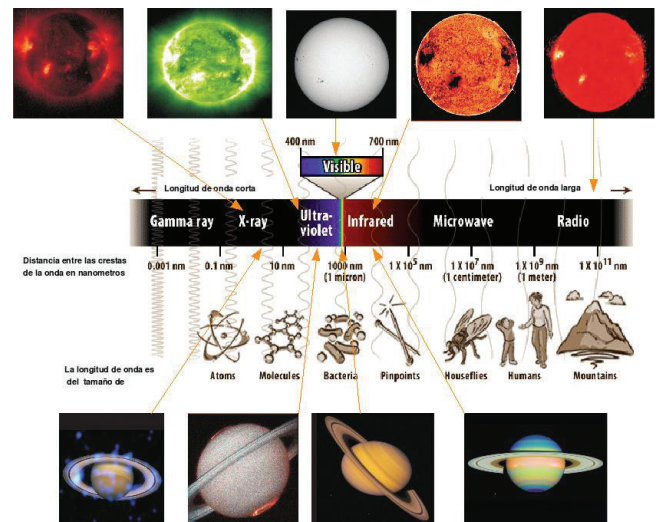


Fig. 1: Espectro electromagnético, con objetos del tamaño de esas ondas. El Sol (arriba) y Saturno (abajo) observados en distintas longitudes de onda (los colores son simulados).

“ven” el Sol y Saturno si los observamos en longitudes de onda que nuestros ojos no pueden detectar. Las fotografías se han hecho con detectores especiales sensibles a esas longitudes de onda.

En el Universo, hay material que está a temperaturas mucho más bajas que la de las estrellas, por ejemplo, nubes de material interestelar. Esas nubes no emiten radiación visible, pero sí pueden ser detectadas en longitudes de onda larga, como el infrarrojo, las microondas y las ondas de radio.

Observar el Universo en todas las regiones del espectro electromagnético, lo que los astrónomos denominan “observación multi longitud de onda”, nos permite tener una imagen mucho más precisa de su estructura, temperatura y energía, y confeccionar modelos mucho más realistas vinculados con su evolución.

En la figura 2 se observa el centro de nuestra galaxia la Vía Láctea fotografiado por los telescopios espaciales Spitzer (en infrarrojo), Hubble (en visible) y Chandra (en rayos X). En cada una de ellos se ob-

servan objetos y detalles que en otras longitudes de onda no se ven.

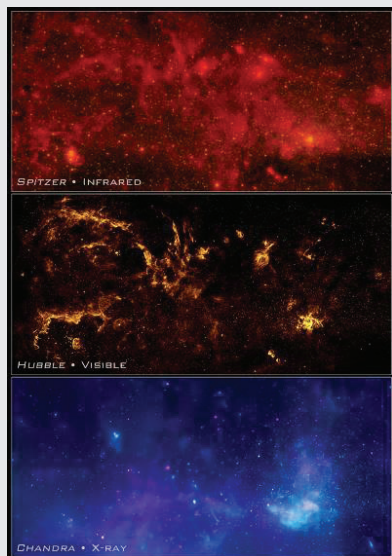


Fig. 2: El centro de nuestra galaxia la Vía Láctea fotografiado en distintas longitudes de onda.

Actividad 2: Construcción de un espectroscopio

La luz blanca de una bombilla con filamento está compuesta de todos los colores. En las bombillas que tienen gas (tubos fluorescentes, bombillas de bajo consumo y de farolas) la luz sólo contiene unos colores determinados. Si separamos los colores de la luz, obtenemos su espectro, que en el caso de los gases está formado por un conjunto de líneas de colores. Cada tipo de gas tiene un espectro propio, que es como la huella digital de los compuestos que hay en el gas. Si observamos con un espectroscopio la luz de una galaxia lejana, las líneas propias del hidrógeno y del resto de gases se ven desplazadas hacia el rojo, tanto más cuanto más lejos esté la galaxia.

Toma un CD o un DVD (figura 3a), con unas tijeras fuertes corta de forma radial un trozo. Si usas un CD, debe ser plateado por la cara que no se graba, es decir, no debe estar impreso, ni ser blanco ni de otro color. Para desprender la capa metálica del CD, puedes servirte de cinta adhesiva, rayando previamente la superficie (figura 3b). Si usas un DVD, lo anterior no es necesario: basta separar en el trozo cortado la capa de plástico superior de la inferior doblándolo ligeramente o con la ayuda de un destornillador, y tendrás la red de difracción preparada.

Haz una fotocopia en papel de la plantilla de la figura 4. Si lo haces en tamaño A3 será más preciso.

Recorta la plantilla, incluyendo la parte blanca en forma de sector circular, y haz una rendija fina en la raya cercana a la escala graduada. Esta escala NO hay que recortarla. Arma la caja dejando la parte negra en el interior, y pega las solapas. En el hueco dejado por el sector circular, pega el trozo de CD o DVD que hemos preparado. Está impreso "CD" y "DVD", para recortar uno u otro sector circular y rendija, según tengas uno u otro tipo de disco.

Mira a través del trozo de disco, dirigiendo la rendija de la caja (no la escala) a una lámpara de bajo consumo o un tubo fluorescente (figura 3), verás claramente sobre la escala las líneas de emisión de los gases que contienen esas bombillas. Si no las ves, mira a la derecha de la lámpara y mueve el espectroscopio lentamente hacia la izquierda hasta que aparezcan las líneas. La escala está graduada en cientos de nanómetros, es decir, la marca 5 indica 500 nm ($500 \cdot 10^{-9}$ m). Cuanto más fina sea la rendija, con mayor precisión podrás medir la longitud de onda de las rayas.

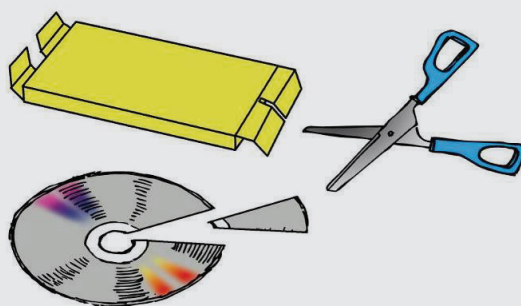


Fig. 3a: Material necesario: DVD, tijeras y caja de cartón.



Fig. 3b: Retirando la capa metálica del CD, con cinta adhesiva.

Puedes hacer la caja con cartulina. En ese caso deberás recortar el rectángulo de la escala y pegar sobre ese hueco una copia de la escala hecha en papel normal, para que se pueda transparentar la escala.

Se pueden mirar las farolas de las calles, tanto las naranjas (de sodio) como las blancas (de vapor de

mercurio). Las bombillas incandescentes tradicionales ofrecen un espectro continuo.

Los alumnos más pequeños pueden descomponer la luz y hacer un arco iris. Necesitan una manguera con difusor, y ponerse con el Sol detrás (figura 5).



Fig. 4: Mirando a un fluorescente



Fig. 5: Los alumnos más pequeños pueden descomponer la luz en un arco iris

El Infrarrojo

La región infrarroja del espectro electromagnético fue descubierta por William Herschel (el descubridor del planeta Urano) en 1800 utilizando un prisma y unos termómetros. Para ello obtuvo el espectro visible, haciendo pasar la luz blanca del Sol a través de un prisma y colocó varios termómetros, uno en la región del azul, otro en el rojo (ambos colores detectables por el ojo) y puso un tercer termómetro más allá del rojo, inmediatamente después. Con un cuarto termómetro midió la temperatura ambiente y descubrió que la temperatura que marcaba el

termómetro en la zona “por debajo” del rojo (y de ahí su nombre “infra” rojo) era mayor que la del ambiente.

Herschel hizo otros experimentos con los “rayos caloríficos” (como los llamaba) que existían más allá de la región roja del espectro: eran reflejados, refractados, absorbidos y transmitidos igual que la luz visible. Estos “rayos caloríficos” fueron posteriormente denominados rayos infrarrojos o radiación infrarroja. Esos descubrimientos fueron seguidos de otros que desembocaron en varias aplicaciones tecnológicas.

Los cuerpos que se encuentran a baja temperatura no emiten en la región visible del espectro, sino en longitudes más largas por lo que la energía que liberan es menor. Por ejemplo, nuestro cuerpo y el de los animales emiten una radiación infrarroja que no la detectamos con el ojo, pero que podemos percibir como el calor que emite el organismo. Todos los objetos que estén a cierta temperatura emiten en infrarrojo (figuras 6). Para verlos de noche fueron inventados los anteojos de visión nocturna, que permiten detectar esta radiación que no percibe el ojo.

Actividad 3: Experimento de Herschel en la banda IR

El objetivo es repetir el experimento de 1800, mediante el cual el famoso astrónomo William Herschel descubrió una forma de radiación distinta de la luz visible. Necesitaremos un prisma de vidrio, cuatro termómetros, rotulador permanente de tinta negra, tijeras, cinta adhesiva, una caja de cartón y una hoja blanca. Ponemos cinta adhesiva en los bulbos de los termómetros y los pintamos con rotulador negro para que absorban mejor el calor.

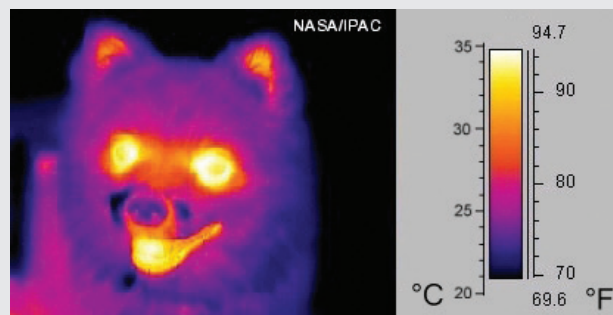


Fig. 6: Fotografía con infrarrojos. Se distinguen zonas más o menos calientes

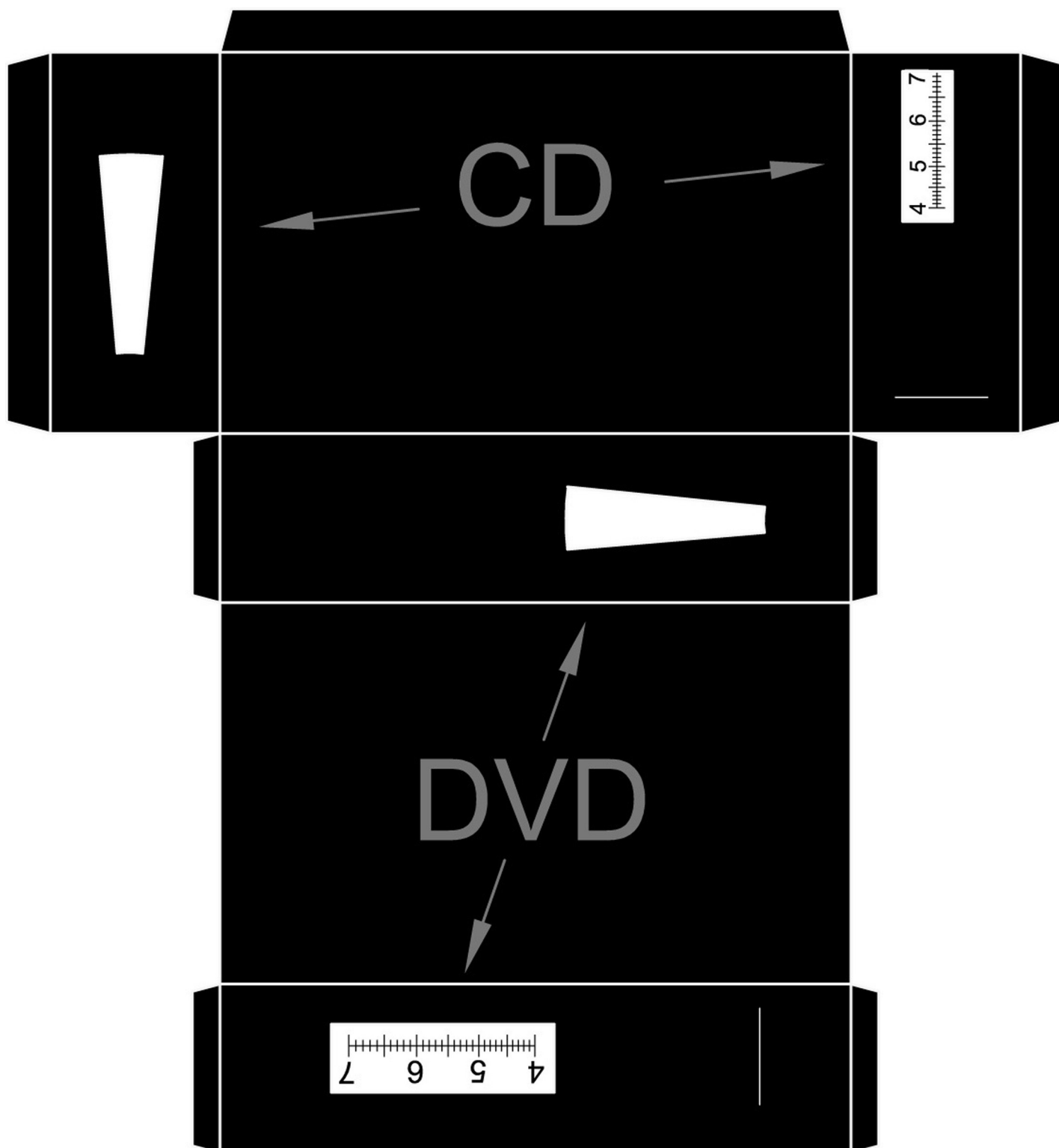


Fig. 7: Plantilla para el espectroscopio

	Termómetro nº1 en el azul	Termómetro nº2 en el amarillo	Termómetro nº3 más allá del rojo	Termómetro nº4 a la sombra
Después de 1 minuto				
Después de 2 minutos				
Después de 3 minutos				
Después de 4 minutos				
Después de 5 minutos				

Tabla 1: Tabla de toma de datos

El experimento se debe realizar al aire libre, en un día MUY soleado. Si hay mucho viento, la experiencia puede hacerse en el interior, siempre que tenga una ventana por donde el Sol ingrese de manera directa. Se coloca una hoja blanca, en el fondo de la caja de cartón. El prisma se coloca cuidadosamente en el borde superior de la caja, de modo que quede del lado del Sol. El interior de la caja debe quedar todo o casi todo en sombra (figuras 8 a 9c). Se gira el prisma cuidadosamente hasta que aparezca un espectro lo más amplio posible sobre la hoja situada en el fondo de la caja.

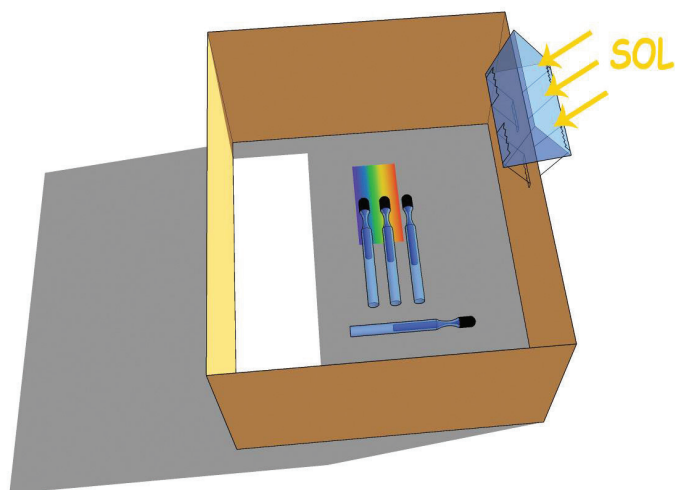


Fig. 8: Dispositivo de Herschel. Los tres termómetros en el espectro marcan mayor temperatura que el ambiente.

Después de asegurar con cinta adhesiva el prisma en esa posición, colocamos tres termómetros en la luz del espectro, de manera que cada bulbo esté en uno de los colores: uno en la región azul, otro en la amarilla y el tercero un poco más allá de la región roja visible. Se debe poder ver bien la escala graduada, para no mover el termómetro cuando tomemos las medidas. El cuarto termómetro lo ponemos en la sombra, no alineado con los anteriores (figuras 8 a 9c).

Las temperaturas tardan unos cinco minutos en alcanzar sus valores finales. Registramos cada minuto en una tabla (ver Tabla 1), las temperaturas en cada una de las tres regiones del espectro y en el de ambiente. No hay que mover los termómetros de su posición en el espectro ni bloquear su luz.

El termómetro en el amarillo (figura 9c) debería marcar una temperatura algo mayor que en el azul, y en el del ambiente, y el que esté cerca del rojo debería marcar una temperatura todavía algo mayor, por lo que es lógico deducir que al termómetro

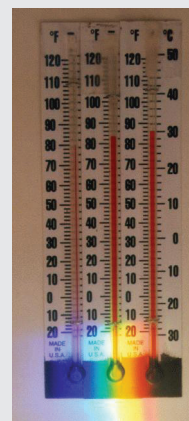
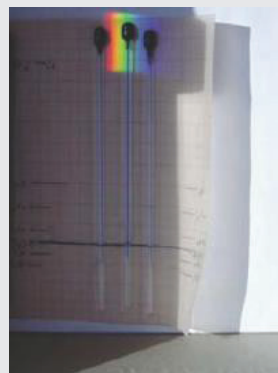


Fig. 9a: Situando los tres termómetros, con el bulbo negro, y el espectro en la parte de la sombra. Fig. 9b: Los termómetros en el azul, en el amarillo y justo después del rojo. Fig. 9c: Un ejemplo de las medidas a los 3 minutos.

junto al rojo le llega algún tipo de radiación del Sol, invisible a nuestra vista.

Actividad 4: Detección del IR con un instrumento tecnológico moderno

Si queremos detectar el IR con instrumentos tecnológicos modernos, probablemente lo primero que viene a la mente son los visores nocturnos, preparados para ver el infrarrojo que emiten nuestros cuerpos. Pero ese no es un recurso al alcance de cualquiera. Veamos un procedimiento más económico y fácil de reproducir.

Los mandos a distancia que utilizamos para encender el televisor, el equipo de música o el microondas utilizan rayos infrarrojos (los que tienen una bombillita roja no nos sirven). ¿Habrá una manera sencilla de ver esa radiación no visible y que de pronto se convierta en detectable?

Para eso debemos buscar un detector sensible al IR. Existe un producto tecnológico de envergadura, que se debe al desarrollo del estudio de la luz en Astronomía, llamado CCD (según las iniciales de su denominación en inglés: Charged Coupled Device). Este dispositivo permite capturar y acumular fotones durante un período de tiempo determinado, de manera que podemos detectar objetos que emiten o reflejan poca luz. El CCD es más sensible

en la región del rojo y, en algunos casos, su rango de eficiencia cubre el IR cercano. Cualquier cámara o videocámara moderna posee un CCD para la adquisición de imágenes. Esto permite sacar fotos en condiciones de muy bajo nivel de iluminación. El dispositivo más sencillo, de uso cotidiano, que posee una cámara moderna y por lo tanto un detector CCD, es el teléfono móvil.

Si miramos el control remoto con nuestros ojos de manera directa, no advertiremos ninguna diferencia entre encendido y apagado, como en la figura 10a. Pero si tomamos la foto con el mismo teléfono móvil, y con el control remoto activado (figura 10b)... ¡Sorpresa! La luz que utiliza el control para enviar la señal que enciende el televisor o cualquier otro equipo electrónico, es una luz infrarroja, que nuestro ojo no ve pero la cámara del teléfono sí detecta. El color de esa luz es color falso.

Actividad 5: Detección de la luz infrarroja de una bombilla

La mayoría de los cuerpos del cielo emiten en muchas longitudes de onda. Si entre ellos y nosotros hay polvo o gas, algunas longitudes de onda pueden quedar bloqueadas, pero otras no. Por ejemplo, el polvo que hay en el centro de nuestra galaxia nos impide ver la intensa luz visible producida por la concentración de millones de estrellas que hay allí. Si embargo ese polvo es transparente a la luz infrarroja, que consigue atravesarla y llegar hasta nosotros. Ocurre lo mismo con otras nubes de polvo oscuro en nuestra galaxia (figuras 11a y 11b).

En las emisiones de una bombilla de filamento incandescente, la mayor parte de la energía que emite es en la región visible, pero también emite en infrarrojo, que puede atravesar lo que el visible no puede. Utilizaremos una linterna y un trozo de tela de fieltro. Esta tela no está tejida y bloquea espe-

cialmente bien la luz visible.

En una habitación a oscuras, encendemos la linterna. A continuación la tapamos con el fieltro y comprobamos que no vemos su luz. Si no es así, ponemos otra capa de fieltro (lo podemos doblar) o incluso una tercera. No conviene poner más de las necesarias, pues se puede bloquear también toda la radiación infrarroja. En esa habitación lo más a oscuras posible, si la observamos con la cámara de fotos de nuestro teléfono móvil, que capta la radiación infrarroja, vemos que sí se distingue la bombilla (figuras 12a y 12b).



Fig. 10a: Control remoto encendido si lo miramos a simple vista, Fig. 10b: Control remoto si lo miramos a través del teléfono móvil.

Actividad 6: Constelación con infrarrojos

En las tiendas de componentes electrónicos o en Internet, venden LEDs infrarrojos, similares a los que usan los mandos a distancia de TV, aparatos de música, etc. Son muy baratos, funcionan con una pila de 3 ó 9 v, o con un alimentador de corriente continua. Se conectan entre sí en paralelo, con una resistencia entre 100 y 500 W. Puedes hacer un pequeño circuito con varios LEDs, formando una constelación conocida, por ejemplo Casiopea (figuras 13a y 13b), Orión, la Cruz del Sur o la Osa Mayor (Según sea el cielo que ves desde el hemisferio en donde vives). Observada con la cámara de fotos del



Fig. 11a: Nube de polvo en la región visible. Fig. 11b: Superponiendo la visión infrarroja.

teléfono, puedes verla en el infrarrojo.

Actividad 7: Constelación con mandos a distancia

Más fácil que lo anterior es formar entre varias personas una constelación conocida con mandos a distancia infrarrojos. Si se las observa a oscuras con una cámara digital, se ve la constelación (figuras 14a y 14b).

Energía electromagnética en la región de radio

Las ondas electromagnéticas de longitud de onda desde metros a kilómetros, se llaman ondas de radio. Son las que se usan en las emisoras comerciales, pero también nos llegan desde el espacio. Esta radiación nos muestra morfologías que en otras longitudes de onda no se ven (figuras 15a, 15b y 15c).



Fig. 12a y 12b: El filtro bloquea totalmente la luz visible pero no la infrarroja.

En el Universo hay intensas fuentes de radio: el centro de nuestra galaxia, estrellas de neutrones en rápida rotación, o incluso algunos planetas como Júpiter.

Actividad 8: Produciendo ondas de radio

Al abrir y cerrar un circuito eléctrico, se producen ondas de radio, similares a las emisiones comerciales. Se pueden captar en un aparato de radio, en la banda AM, y transformarlas en sonido, que es otro tipo de ondas. La potencia de esas emisiones de radio disminuye al alejarse el receptor. Las ondas de radio pueden atravesar obstáculos e incluso pa-

redes.

Para realizar este experimento, tomamos dos trozos de cable de unos 20 cm cada uno. Quitamos el plástico en los dos extremos de uno de los trozos. En el otro cable, quitamos también el plástico en un extremo, dejamos unos 10 cm con plástico y quitamos también el plástico en el resto. En el extremo donde hay mucho cable pelado, haz con él una bola. El otro extremo conéctalo a un borne de una pila de 9 V.

Sacamos punta a un lápiz por los dos extremos. Su mina de carbón nos servirá de resistencia, por lo que no valen las pinturas de colores. En un extremo conectamos la mina al primer trozo de cable, asegurándolo con cinta adhesiva. El otro extremo del cable lo conectamos al segundo borne de la pila (figura 16).

Encendemos la radio y la ponemos en la banda de AM, (no de FM). Golpeamos con la punta libre del lápiz a la bola de cable. Movemos la sintonía de la radio hasta que se pueda oír por la radio los golpecitos que damos a la bola. Podemos probar a alejar la radio, a poner obstáculos de cartón, madera, etc. También podemos llevarnos la radio a otra habitación y comprobar si se oye o no. Debe tenerse en cuenta que la energía electromagnética producida

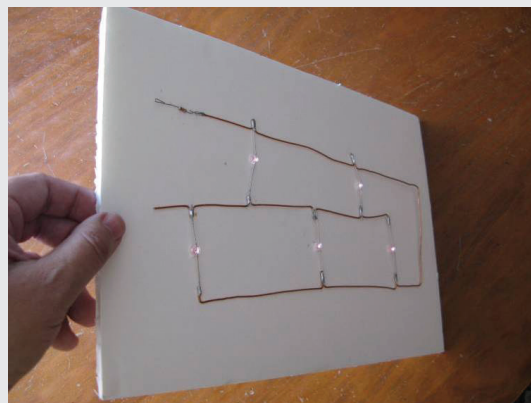
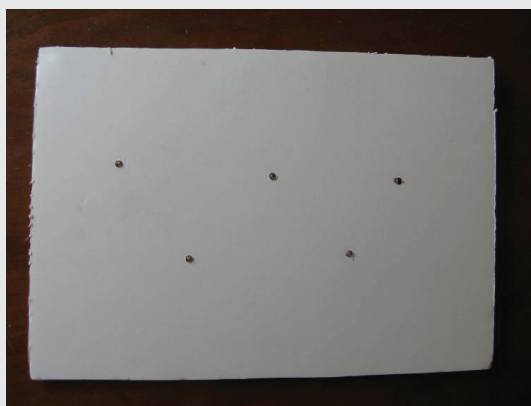


Fig. 13a y 13b: Casiopea hecha con LEDs infrarrojos conectados en paralelo.

se transforma primero en eléctrica y luego en sonora.

Actividad 9: Escuchando la voz de Júpiter

Júpiter emite ondas de radio en varias frecuencias. No está clara su procedencia, pero parece que tienen que ver con su campo magnético y también con su luna Io. Una emisión es en la banda de frecuencias de 18 a 22 MHz, con un máximo en 21 MHz. Esos valores entran dentro de la capacidad de bastantes receptores caseros. Deben tener Onda Corta (SW) y llegar el dial a esos valores.

Las emisiones de Júpiter no son continuas. Tiene tres chorros más o menos equidistantes que giran con el planeta cada diez horas. Además, esos chorros a veces están activos y a veces no, por lo que conviene armarse de buenas dosis de paciencia.

Para oírlas necesitaremos una radio que tenga onda corta (SW) cuyo dial llegue hasta 18 ó mejor

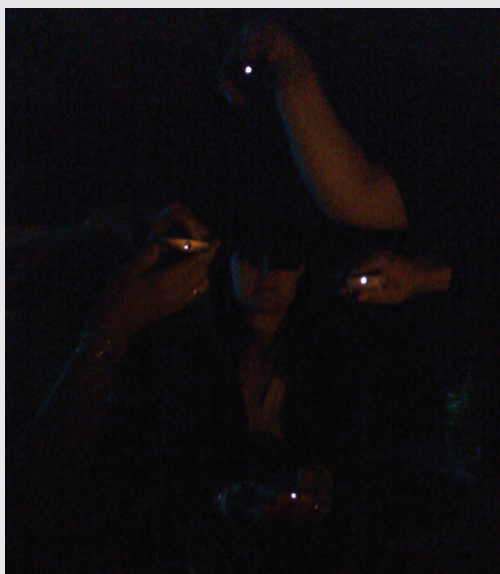


Fig. 14a y 14b: Formando la constelación Cruz del Sur con mandos a distancia infrarrojos.

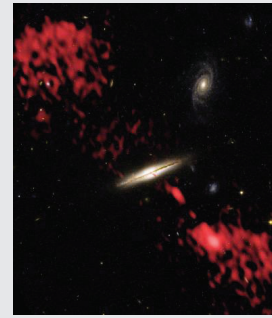


Fig. 15a: Esta galaxia emite unos chorros sólo detectables en radio (coloreados artificialmente de rojo).

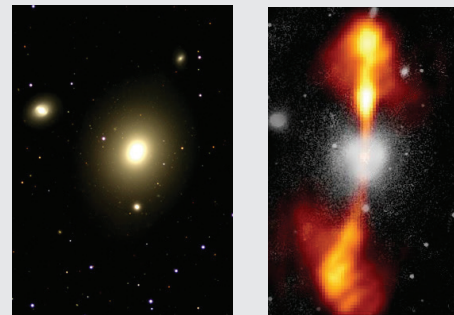


Fig. 15b: Fotografía de la galaxia NGC 4261 en el visible.

Fig. 15c: La misma galaxia con la imagen de radio superpuesta. Se observan unos chorros de materia coloreados artificialmente de rojo.

22 MHz. Situemos el dial en un punto entre 18 y 22 MHz en que no haya mucho ruido de fondo, y esperamos. Las emisiones suenan como olas de mar en una playa (o ráfagas de viento), que llegasen con una frecuencia de unas tres por segundo aproximadamente. Su intensidad crece hasta un máximo que dura algunos minutos —o segundos a veces—, y después decae. La experiencia dice que si estás 20 minutos a la escucha, tienes 1 probabilidad entre 6 de oírlas. Como es lógico, Júpiter debe estar en el cielo, aunque no le interfieren las nubes.

La propia antena de la radio es adecuada, aunque es omnidireccional y captará ondas que procedan



Fig. 16: Produciendo ondas de radio.

de todas las direcciones. Si queremos mejorar la escucha, y además asegurar que procede de Júpiter, debemos construir una antena direccional que sustituya a la normal. Pero no es imprescindible. Se hace de la siguiente forma: tomamos 165 cm de alambre de cobre, y hacemos una circunferencia con él, sin cerrarla, formando la antena. La sujetamos a cuatro palos de 30 cm de longitud. Forramos una madera de 60 x 60 cm por una cara con papel de aluminio. Clavamos en ella la circunferencia de cobre con los cuatro palos. Conectamos el cable interior de un cable coaxial de antena a la circunferencia de cobre, y la malla exterior del coaxial al aluminio. El otro extremo lo conectamos a la ante-

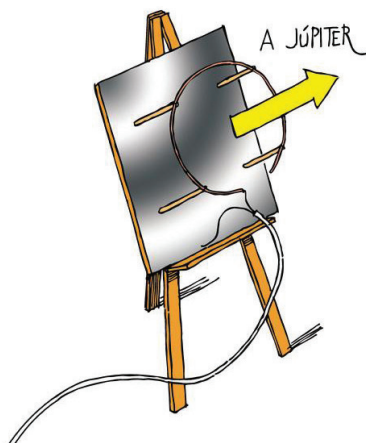


Fig. 17: Antena para oír a Júpiter.

na de la radio. Por último, dirigimos la antena hacia Júpiter.

Luz Ultravioleta

Los fotones de luz ultravioleta tienen más energía que los de luz normal visible. Eso hace que esta luz, en dosis altas, destruya enlaces químicos de las moléculas orgánicas, por lo que es mortal para la vida. De hecho se usa para esterilizar material quirúrgico.

El Sol emite esta radiación, pero afortunadamente la atmósfera (en especial la capa de ozono) filtra la mayor parte, y sólo nos llega la justa para que sea beneficiosa para la vida. Esta luz es la que pone morena nuestra piel, las plantas la absorben para la fotosíntesis, etc. Pero si la capa de ozono disminuyese su espesor, nos llegaría demasiada dosis y aumentarían mucho las enfermedades de tipo cancerosas.

Actividad 10: Luz negra (UV)

Hay bombillas llamadas de Luz negra, que emiten sobre todo en UV, y se usan con frecuencia para favorecer el crecimiento de las plantas en invernaderos o en zonas con poca iluminación solar. El cristal

de esas bombillas suele ser casi negro, y emiten sólo un poco de luz visible azul oscura. Algunas tejidos sintéticos blancos de camisas y camisetas son fluorescentes con esa luz y la reflejan de un color morado brillante. Por esa razón esta iluminación se



Fig. 18: Un billete de 50 € iluminado con luz UV, muestra unas pequeñas tiras fluorescentes marcadas aquí con flechas.



Fig. 19: Detector de billetes falsos, que usa luz ultravioleta.

usa en algunas discotecas, pues los tejidos blancos se ven relucientes.

Esa propiedad se usa también al fabricar el papel de muchos billetes: se introducen unas pequeñas tiras de material fluorescente, que son visibles al ser iluminados por luz UV (figura 18). De esta forma se ve que no es una simple fotocopia del billete. Esta luz viene incorporada en los aparatos detectores de billetes falsos (figura 19). Muchos carnets oficiales tienen escudos o letreros que sólo son visibles con luz UV.

Rayos X

Más energética que la UV es la radiación X. Se usa en medicina en las radiografías y otras formas de radiodiagnóstico (figura 20).

En el cosmos, los focos de rayos X son característicos de sucesos y objetos muy energéticos: agujeros negros, colisiones, etc. El telescopio espacial Chandra tiene como misión la detección y seguimientos de estos objetos (figura 21).



Fig. 20: Placa de rayos X usada en medicina.

Rayos Gamma

En el extremo del espectro, y con longitudes de onda todavía más cortas que las anteriores está la radiación gamma. Es la radiación más energética y se produce cuando materia (un electrón) se encuentra con antimateria (un positron), ambas se



Fig. 21: Galaxia M81 con el núcleo fotografiado en Rayos X, que sugiere la presencia de un agujero negro muy masivo.

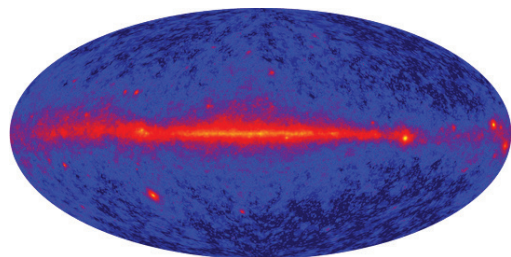


Fig. 22: Mapa del Universo tal como lo ve el "Fermi Gamma-Ray Space Telescope". La línea central es nuestra galaxia.

aniquilan produciendo fotones gama. En el cosmos hay diversas fuentes (figura 22), pero no es raro que haya violentas erupciones puntuales que emiten durante unas pocas horas un potente chorro de rayos gamma.

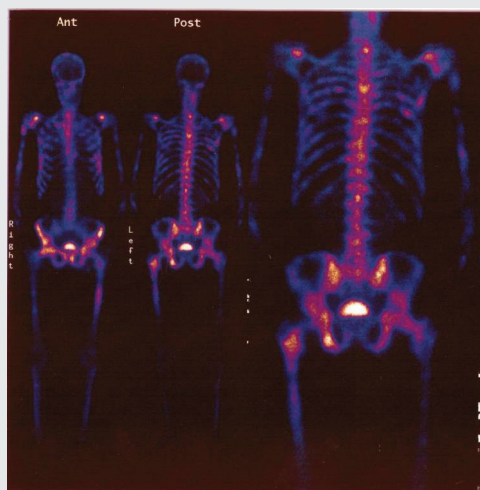


Fig. 23: Gammagrafía ósea del cuerpo humano.

Como duran tan poco, el problema es detectarlas y definir su situación exacta, para saber qué objeto había en esa posición antes del estallido e intentar averiguar qué ha pasado. Los astrónomos suelen asociarlos a colisiones de agujeros negros, aunque todavía no está muy claro.

En la Tierra esta radiación la emiten la mayoría de elementos radioactivos. Igual que los rayos X, se usan en medicina tanto en pruebas de imagen (figura 23) como en terapias para curar enfermedades como el cáncer.

Bibliografía

- Mignone, C., Barnes, R., More than meets the eye: how space telescopes see beyond the rainbow, Science in the School, Eiro Forum, 2014
- Moreno, R, Experimentos para todas las edades, Ed. Rialp. Madrid, 2008.

Fuentes Internet

- Spitzer Telescope, Educacion, California Intitute of Technology.
- <http://www.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/index.shtml>
- http://www.scienceinschool.org/2014/issue29/EM_Astronomy
- <https://www.khanacademy.org/science/cosmology-and-astronomy/universe-scale-topic/light-fundamental-forces/v/introduction-to-light> --
- Chandra X-ray Observatory <http://chandra.harvard.edu/about/>
- The Fermi Gamma-ray Space Telescope <http://fermi.gsfc.nasa.gov/>

Expansión del Universo

Ricardo Moreno, Susana Deustua, Rosa M. Ros

International Astronomical Union, Colegio Retamar (Madrid, España), Space Telescope Science Institute (Baltimore, USA), Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España)

Resumen

Este taller contiene siete actividades sencillas de realizar, en las que vamos a trabajar los conceptos clave de la expansión del Universo: en la primera veremos de qué se trata el efecto Doppler, en la segunda, tercera, cuarta y quinta experimentaremos cualitativamente con la expansión de un alambre, una goma, de un globo y de una superficie de puntos respectivamente. En la sexta actividad veremos de forma cuantitativa, la expansión de una superficie e incluso calcularemos la constante de Hubble para ese caso. En la séptima detectaremos la radiación de fondo de microondas.

Objetivos

- Comprender qué es la expansión del Universo.
- Comprender que no hay un centro del Universo.
- Comprender qué es la Ley de Hubble.
- Comprender el significado de la materia oscura y simular lentes gravitacionales.

El Origen del Universo

La teoría sobre el origen del Universo más aceptada hoy día se conoce con el nombre de Big Bang: hubo un evento singular original, que inició una expansión del propio espacio. Pero no son las galaxias las que se mueven “a través del espacio”, sino que es el espacio entre ellas el que se expande, arrastrando a las galaxias. Por esa razón no se puede hablar de un centro del Universo, como no se puede hablar de un país que esté en el centro de la superficie terrestre.

La velocidad de recesión de una galaxia y la distancia a la que están de nosotros es proporcional. La constante que las relaciona es la llamada constante de Hubble. La ley de Hubble relaciona de forma lineal la distancia de una galaxia con la velocidad con que se aleja.

La primera prueba del Big Bang vino con la observación del corrimiento al rojo en los espectros de las galaxias. La prueba que dio el espaldarazo definitivo a la teoría del Big Bang, fue la detección de la radiación de fondo de microondas.

Corrimiento al rojo

Si en el laboratorio miramos con un espectroscopio la luz que nos llega de una gas caliente, por ejemplo hidrógeno, veremos unas líneas de colores que son típicas de ese gas, a unas longitudes de onda fijas. Si hacemos lo mismo con la luz que nos llega desde una remota galaxia, vemos esas líneas pero

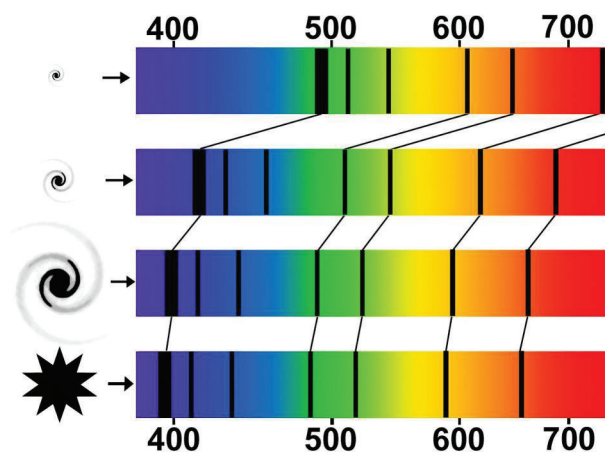


Fig.1: Cuanto más alejada está la galaxia, su espectro se desplaza más hacia el rojo, lo que nos dice que se aleja a mayor velocidad de nosotros.

desplazadas (figura 1). Es el llamado corrimiento al rojo, pues para la mayoría de las galaxias el desplazamiento es hacia ese color.

Ese corrimiento al rojo de la luz es debido al alejamiento de la galaxia respecto a nosotros, de forma similar a un silbido de una locomotora o de como una moto cambia su tono según se acerque o se aleje de nosotros. Cuanto mayor sea ese corrimiento, mayor será la velocidad.

Estudiando el espectro de las galaxias de nuestro grupo local, se obtiene que la Gran Nube de Magallanes se aleja de nosotros a 13 km/s, y la Pequeña se acerca a 30 km/s. Andrómeda se acerca a 60 km/s mientras que M 32 (una de sus galaxias satélite) se aleja a 21 km/s. En otras palabras, las galaxias cercanas tienen movimientos relativos pequeños y de forma irregular.

Pero si vamos al cúmulo de Virgo, a una distancia

media de 50 millones de a.l., veremos que todas se alejan de nosotros a velocidades entre 1.000 y 2.000 km/s. Y en el supercúmulo de Coma Berenice, a 300 millones de a.l., las velocidades de alejamiento oscilan entre 7.000 y 8.500 km/s. Pero si miramos en dirección opuesta, obtenemos que M 74 se aleja de nosotros a 800 km/s y M 77 a 1.130 km/s. Y si apuntamos a galaxias más lejanas y débiles, la velocidad de recesión es aún mayor: NGC 375 se aleja a 6.200 km/s, NGC 562 a 10.500 y NGC 326 a 14.500 km/s. Miremos hacia donde miremos, todas, excepto las muy cercanas, se alejan de nosotros. ¿Estarán enfadadas con la nuestra?

El corrimiento al rojo de las líneas espectrales, puede medirse mediante el análisis espectroscópico. Los astrónomos usan un instrumento un poco más sofisticado, pero esencialmente igual que el que se muestra y construye en el taller del espectro solar.

Actividad 1: El efecto Doppler

El efecto Doppler es el que hace variar la longitud de onda de un sonido cuando la fuente está en movimiento. Lo experimentamos en el sonido de motos o coches en una carrera: el sonido es distinto al acercarse y al alejarse. O en un coche de bomberos que pasa junto a nosotros, en el silbato de un tren en movimiento, etc.

Se puede reproducir haciendo girar en un plano horizontal un zumbador, por ejemplo un reloj despertador. Introducimos el reloj en una bolsa de tela (figura 2a) y lo atamos con una cuerda. Al hacerlo



Fig. 2a: Reloj despertador, bolsa y cuerda.



Fig. 2b: Lo hacemos girar sobre nuestras cabezas. Los espectadores oyen la diferencia de tono.

girar sobre nuestras cabezas (figura 2b), se puede oír que cuando se acerca al espectador, la λ se acorta y el sonido es más agudo. Cuando se aleja, la λ se alarga y el sonido es más grave. El que está en el centro de giro no detecta ninguna variación.

Este es el efecto Doppler debido al desplazamiento. Pero no es el que tienen las galaxias con la expansión. Las galaxias no se mueven a través del espacio, sino que es el espacio entre ellas el que se expande.

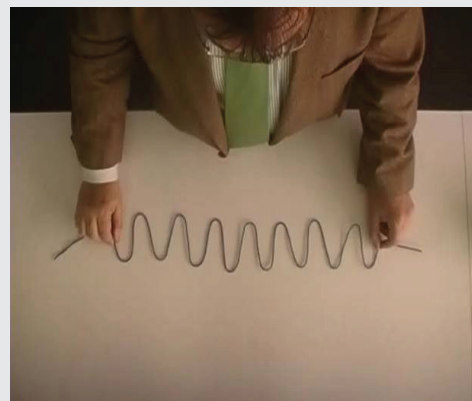


Fig. 3a: Ondas hechas con cable semirrígido.

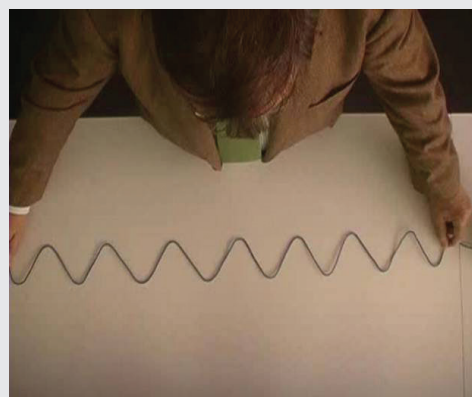


Fig. 3b: Mismas ondas, estiradas, con una longitud de onda mayor.

Actividad 2: El “estiramiento” de los fotones

El Universo, al expandirse, “estira” los fotones que hay en él. Cuanto más tiempo dura el viaje del fotón, más estiramiento sufre. Se puede hacer un modelo de ese estiramiento con un cable semirrígido, del que se usa en las instalaciones eléctricas empotradas de las casas. Se corta aproximadamente un metro, y se dobla con la mano haciendo varios ciclos de una sinusoide, representando varias ondas (figura 3a).

Se toma el cable con las dos manos y se estira (figura 3b) y se observa que la longitud de onda aumenta, como ocurre en la radiación que nos llega desde una galaxia. Cuanto más lejos está de noso-

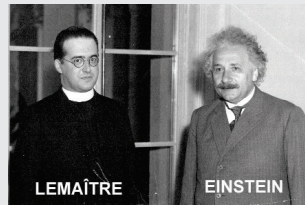
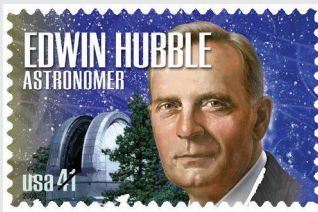


Fig. 4: Edwin Hubble. Fig. 5: George Lemaître y Albert Einstein.

tros, más tiempo ha tenido para estirarse y se ha desplazado más hacia el rojo (mayores).

Ley de Hubble

Fue Edwin Hubble (figura 4) quien se dio cuenta en 1930 del desplazamiento al rojo de las galaxias, y estableció la ley que lleva su nombre: cuanto más lejana está una galaxia, más de prisa parece que se aleja de nosotros. Esto indica que el Universo se expande en todas direcciones, por lo que todos los cuerpos que están en él se van alejando unos de otros. El que veamos alejarse de nosotros a todas las galaxias no significa que estemos en el centro: lo mismo observaría un extraterrestre desde cualquier lugar del Universo, como pasa en una explosión de unos fuegos artificiales: todas las partículas luminosas se van separando entre sí movidas por la explosión de la pólvora.

Sin embargo, el modelo real no es el de unas galaxias moviéndose a través del espacio, sino que es el espacio entre ellas el que se expande, arrastrando a las galaxias.

Si el espacio se expande en todas direcciones, significa que dando marcha atrás al tiempo, la materia debió estar concentrada en algún momento inicial en el que todo empezó.

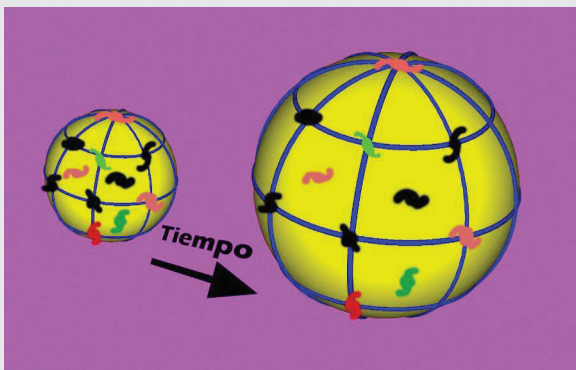


Fig. 6: Según pasa el tiempo, el espacio va expandiéndose y la materia contenida en él va separándose entre sí.

Así fue como George Lemaître (figura 5) estableció el modelo del Universo más aceptado hoy día:

hubo una gran explosión original y en ella estamos montados todavía. En esa expansión es el propio espacio el que va dilatándose. Para entender esto imaginemos un globo de goma con una serie de puntos dibujados en su superficie, que representan las galaxias (figura 6). Según lo vamos hinchando, el espacio de goma elástica entre las motas va aumentando. De igual forma según pasa el tiempo, el espacio va expandiéndose, y la materia contenida en él va separándose entre sí.

Por tanto, la velocidad aparente de recesión de una galaxia y la distancia a la que están de nosotros es proporcional. La constante que las relaciona es la llamada constante de Hubble. La ley de Hubble relaciona la distancia de una galaxia con la velocidad aparente con que se aleja:

$$v=H \cdot d$$

Para determinar su valor bastaría saber la velocidad y la distancia de algunas galaxias. La velocidad con que una galaxia parece alejarse es fácil de medir con precisión por el corrimiento al rojo, pero la distancia a la que está, especialmente en el caso de las más lejanas, es más difícil. Los científicos no se ponen de acuerdo en el valor de la constante de Hubble. Según se use un método u otro salen unos valores, que en general oscilan entre 50 y 100 km/s por Megaparsec. El valor más aceptado actualmente es aproximadamente 70, lo que indica una edad del Universo de 13.700 millones de años.

Actividad 3: El Universo en una goma elástica

Edwin Hubble descubrió que todas las galaxias parecen alejarse de nosotros. Cuanto más lejos están, más rápidamente lo hacen. La llamada Ley

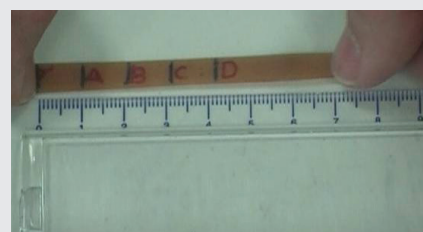


Fig. 7a: Goma sin estirar.



Fig. 7b: Goma estirada.

de Hubble establece que la velocidad aparente de alejamiento de una galaxia respecto a nosotros es proporcional a su distancia. No es que las galaxias se muevan por el espacio, es el mismo espacio que hay entre ellas el que se agranda. La Ley de Hubble es, por tanto, una consecuencia lógica de la expansión del Universo. Y aunque todas las galaxias parezcan alejarse de nosotros, no significa que estemos en el centro del Universo.

Para realizar esta experiencia, hay que hacer unas marcas sobre la goma cada cm con un rotulador. Cada una representará una galaxia (la A, B, C, etc.). Nuestra galaxia será la primera.

Sitúa la goma cerca de la regla (figura 7a). Haz que nuestra galaxia coincida con la marca del 0 cm. Las otras galaxias A, B, C, ... coincidirán con las marcas 1, 2, 3, 4...cm.

Estira la goma (figura 7b) de tal forma que nuestra galaxia se mantenga en la marca de 0 cm, y que la siguiente (la A) se sitúe sobre la de 2 cm. La distancia de esta galaxia a la nuestra se ha duplicado. ¿Qué ha pasado con la distancia entre las demás galaxias B, C, D y la nuestra?, ¿también se han duplicado?

Supón que el tiempo que ha durado el estiramiento de la goma ha sido 1 segundo. Las velocidades con que aumentan la distancia de las otras galaxias respecto de la nuestra ¿son todas iguales o unas se alejan más deprisa que otras?



Fig. 8a: Los trozos de porexpán pegados en el globo a medio hinchar.



Fig. 8b: Los trozos de porexpán se alejan cuando el globo está más hinchado.

Para simular lo que vería un habitante de una "galaxia" vecina, puedes mantener fijo en el estiramiento la galaxia B. ¿Cómo verá la nuestra y las otras galaxias? ¿También le parece que todas se alejan de la suya?

Actividad 4: El Universo en un globo

En la expansión del Universo, es el espacio entre las galaxias el que se expande. Las propias galaxias no se expanden, no cambian de tamaño. Lo que está unido fuertemente por la gravedad, no aumenta su dimensión.

Hay un sencillo experimento que permite mostrar este aspecto. Basta usar un globo que lo inflamos un poco al principio. Después pegamos sobre su superficie con adhesivo unos cuantos trocitos de porexpán (también valen monedas). A continuación seguimos inflando el globo hasta llegar al máximo que podamos. Los trocitos de porexpán se irán separando unos de otros (figuras 8a y 8b). Algunos parecerán alejarse más que otros, pero ninguno se acercará ni cambiará su tamaño. Es un modelo muy sencillo de la expansión del Universo.

Actividad 5: Cálculo de la constante de Hubble

La Ley de Hubble dice que la velocidad aparente de alejamiento de una galaxia v es proporcional a la distancia d a la que esté de nosotros:

$$v = H \cdot d$$

La velocidad v realmente es la velocidad de aumento de la distancia que hay desde esa galaxia a nosotros, ya que la galaxia parece moverse, pero realmente es el espacio entre ella y nosotros el que se expande. La constante H se llama constante de Hubble, y se puede calcular sabiendo distancias y

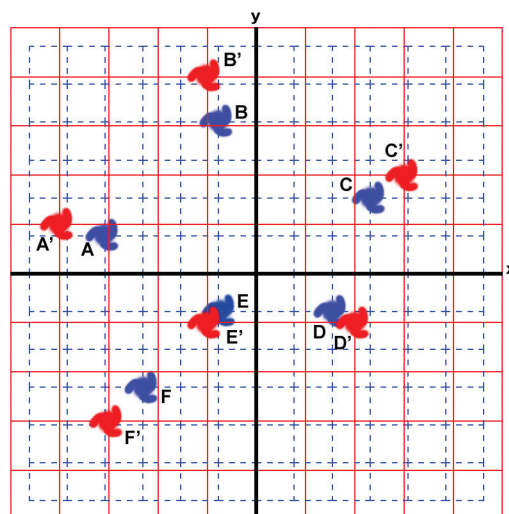


Fig 9: La cuadrícula de trazo continuo (rojo) es la misma que la de trazo discontinuo (azul) pero expandida. Las galaxias están fijas a las cuadrículas.

Galaxia	Coordenadas x,y	d =distancia al origen	Δd	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
A	(-4, 1)				
A'	(-4, 1)				
B	(-1, 4)				
B'	(-1, 4)				
C	(3, 2)				
C'	(3, 2)				
D	(2, -1)				
D'	(2, -1)				
E	(-1, -1)				
E'	(-1, -1)				
F	(-3, -3)				
F'	(-3, -3)				

Tabla 1: Con las coordenadas escritas como ejemplo.

Galaxia	Coordenadas x,y	d =distancia al origen	Δd	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
A					
A'					
B					
B'					
C					
C'					
D					
D'					
E					
E'					
F					
F'					

Tabla 2: Se rellena con los datos de la figura 9.

velocidades del aumento de distancias a algunas galaxias. Despejando en la fórmula anterior:

$$H = v/d$$

En el diagrama de la figura 9 se muestra el espacio, representado por una cuadrícula azul de líneas a trazos, con nosotros en el centro y varias galaxias en azul a cierta distancia de nosotros. Al cabo de cierto tiempo, supongamos 10 segundos, el espacio se ha expandido y queda representado en rojo, tanto la cuadrícula (en líneas continuas) como las galaxias.

Rellena la tabla 1, en cada fila se ponen los datos de una galaxia. Por ejemplo, las coordenadas se estiman con las cuadrículas azul (líneas de trazos) o roja (líneas continuas), según sea la galaxia A o la A' respectivamente, la distancia d se obtiene midiendo con una regla la longitud en cm que hay desde nosotros (en el centro) al centro de esa galaxia. Los datos de la columna Δd se obtienen restando las distancia de A' y la de A. Y en la última columna hay que usar en el denominador la distancia antes de expandirse (por ejemplo, la de A, no la de A').

Comprobarás que:

- Las coordenadas de cada galaxia no varían con la expansión (las galaxias no se mueven a través del espacio).
- El valor de H es bastante constante, indepen-

dientemente de las galaxias.

El Big Bang

Actualmente, la teoría del origen del Universo como una gran explosión es la más aceptada en la comunidad científica, aunque no faltan quienes la ponen en duda porque aún hay detalles que quedan sin explicación. En 1994 la revista americana Sky & Telescope hizo un concurso para bautizarla de nuevo. Se recibieron 12.000 propuestas, pero ninguna consiguió desbancar a la que ya tenía: teoría del Big Bang o de la Gran Explosión. El nombre se lo puso despectivamente el astrónomo Fred Hoyle, a quien, con ciertos prejuicios antirreligiosos, le sonaba demasiado acorde con la idea de un Creador.

De la observación de un Universo en expansión se deduce que, dando marcha atrás al tiempo, hubo un principio en el que se produjo la explosión, dando origen al espacio y al tiempo tal como ahora lo conocemos. Y cabe preguntarnos ¿qué fue lo que la produjo? ¿por qué ocurrió? La ciencia no da respuesta, ya que sólo trabaja con el funcionamiento de lo ya existente. La ciencia sí intenta explicar cómo se produjeron los hechos a partir del Big Bang, pero no por qué existe la materia. Ese tipo de preguntas corresponde responderlas a los filósofos, que tratan de la metafísica (más allá de la física).

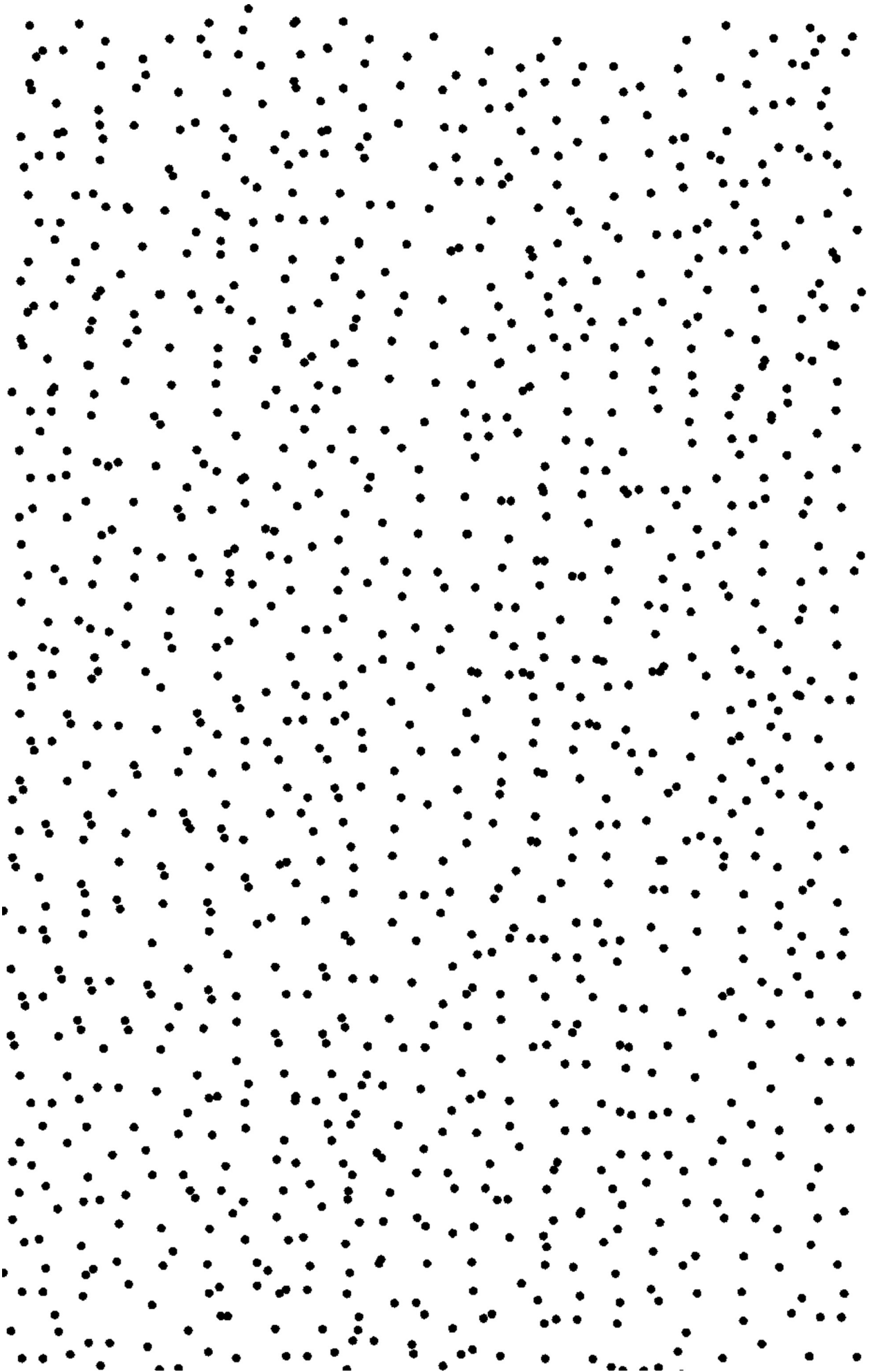


Fig. 10: Fotocopiar esta página en una transparencia, y luego en otra ampliada 105 %.

Algunos intentos de explicar la causa por parte de algunos físicos recurriendo a conceptos como fluctuaciones cuánticas de la nada confunden el vacío con la nada: el vacío cuántico existe, pues tiene espacio y cierta energía. El concepto de nada no es científico, es metafísico, y significa ausencia de toda existencia, por lo que ni siquiera hay en ella espacio. En la nada, nada puede ni existir ni fluctuar. Otras teorías hablan de multi-universos, pero por definición, son imposibles de comprobar (si pudiésemos observar de alguna forma otro universo, entraría a formar parte del nuestro, ya que nuestro Universo es toda la materia que está a nuestro alcance de alguna manera). Por esa razón, esas teorías tampoco son científicas.

Volvamos a la ciencia. En el instante inicial toda la materia y energía estaban en una singularidad infinitamente pequeña y densa. El Big Bang fue la explosión del espacio al comienzo del tiempo. Y a partir de ese momento la materia empezó a funcionar con unas leyes que estaban escritas en su interior, y que condujeron al Universo a la situación actual.

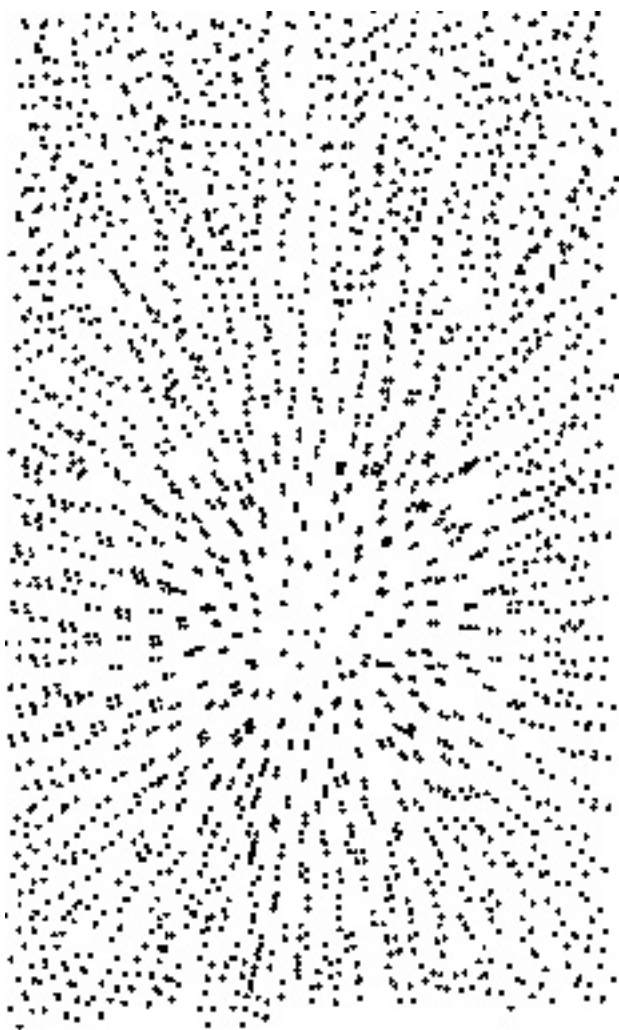


Fig. 11a: Superposición de dos transparencias de puntos, una de ellas ampliada un 105 %.

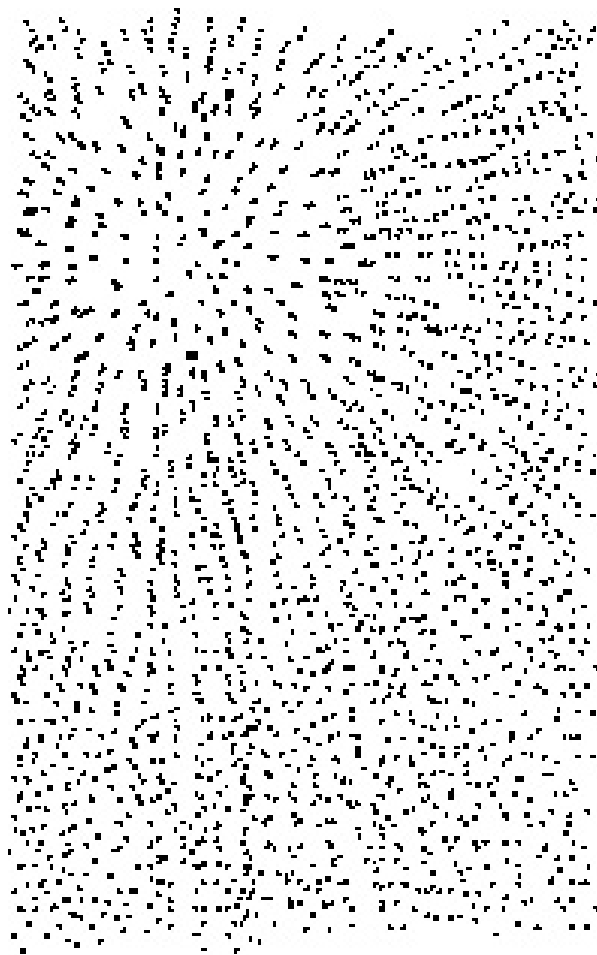


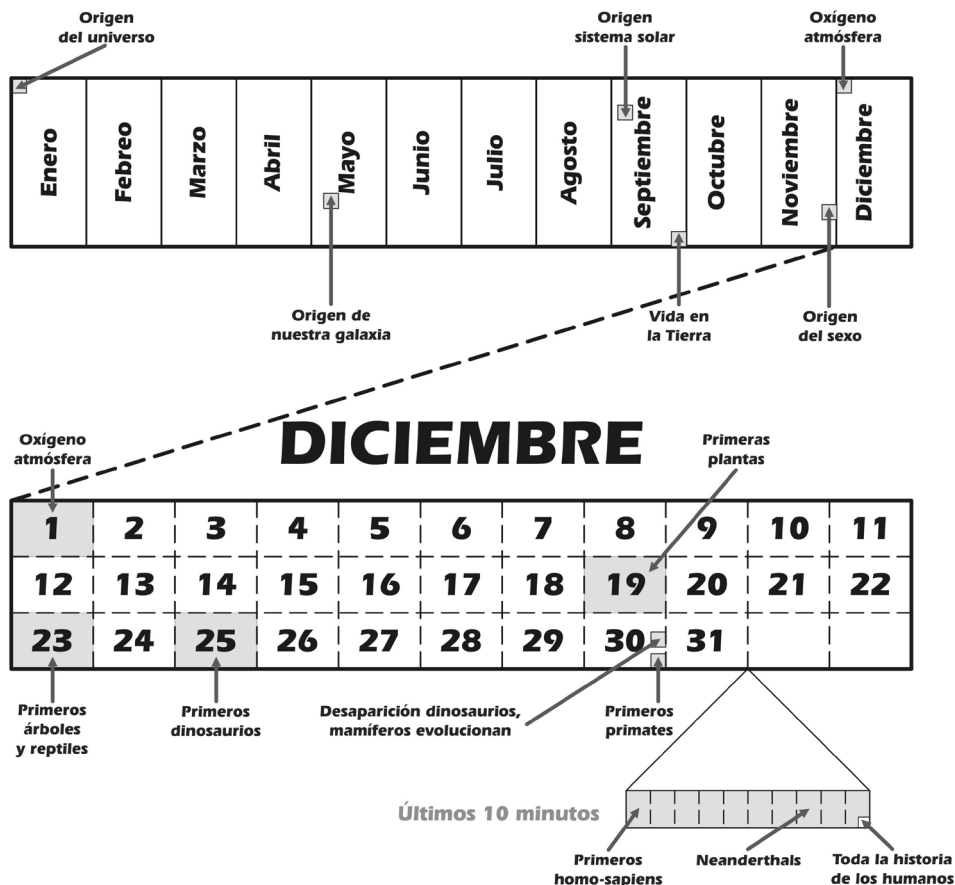
Fig. 11b: Si hacemos coincidir otro punto, también parece que todo se aleja de él: no hay un centro de expansión.

Actividad 6: No hay un centro de expansión

En la figura 10 aparece un dibujo con muchos puntos, que simulan las galaxias en un momento determinado. Hagamos de él una primera fotocopia en papel transparente y luego otra en otro papel transparente, ligeramente ampliada (por ejemplo un 105%).

Si las superponemos en un retroproyector de transparencias, obtenemos una imagen (figura 11a) que representa significativamente el espacio al expandirse con el tiempo: hay un punto en el que coinciden las dos transparencias, y se observa muy bien el desplazamiento de todos los demás puntos que es radial, y tanto mayor cuanto más alejado esté del punto coincidente. Parecería como si los puntos se alejaran más deprisa cuanto más lejos estén del punto coincidente.

Pero si el punto coincidente es otro (figura 11b), ocurre lo mismo. Así pasa en el espacio: desde nuestra galaxia vemos que todas se alejan de nosotros, y más rápido cuanto más lejos esté del observador. Nos parece que estamos en el centro del Universo, pero no es así, ya que un observador situado en otra galaxia vería lo mismo y le parece-



El calendario cósmico - Toda la historia de la la civilización humana ocurrió en los últimos 21 segundos.

Fig.12: La historia del Universo en un año.

ría estar él en el centro. Realmente no hay ningún centro.

Desarrollo del Universo

Para hacernos una idea de la historia posterior, supongamos que todo el tiempo desde el Big Bang hasta ahora lo comprimimos en un año, del 1 de enero al 31 de diciembre (ver figura 12). Hasta mayo no se formó nuestra Vía Láctea. A primeros de setiembre se formó el Sol, y la Tierra tuvo forma esférica a mediados de ese mes. Pero no es hasta primeros de diciembre cuando el oxígeno se hace presente en nuestra atmósfera. Aunque unas células vivas muy sencillas aparecen enseguida sobre la Tierra, las células con núcleo como las actuales aparecen el 2 de diciembre y el día 12 los primeros organismos pluricelulares. El 19 aparecen las plantas y peces, y el 23 los árboles, insectos y reptiles. El 25 aparecen los dinosaurios, que duran hasta el 28. En el día 30 los mamíferos viven ya sobre la Tierra, pero no es hasta el 31 de diciembre, a las 11 de la noche, cuando aparece el hombre. A las 11 h. y 57 minutos es cuando vive el hombre de Neanderthal y en el último minuto cuando se pintan las cuevas de Altamira. Cinco segundos antes de las doce de la noche es cuando nace Jesucristo. El último siglo serían las últimas dos décimas de segundo.

Radiación de fondo de microondas

En el comienzo, a temperaturas elevadísimas, las



Fig. 13: Al pasar el tiempo, el espacio se expande, y los fotones que viajaban por él en el inicio, han dilatado mucho su longitud de onda. Es la radiación de fondo de microondas.

cuatro fuerzas que ahora conocemos estaban unificadas. La gravedad, la fuerza electromagnética, la fuerza nuclear fuerte y la débil —estas dos últimas sólo actúan en el interior de los átomos, y por tanto son menos famosas entre la gente— estaban unidas. Enseguida se separaron y se formaron los fotones, los electrones, los protones y las demás partículas elementales. A la vez que se expandía, el Universo se iba enfriando. Al cabo de 300.000 años la temperatura bajó lo suficiente para poderse formar los átomos, principalmente hidrógeno y helio. La densidad bajó y los fotones quedaron libres para poder moverse en todas

direcciones: se hizo la luz. Los científicos dicen que el Universo se volvió transparente. Esos fotones siguen viajando por el espacio actualmente, aunque éste se ha enfriado y dilatado tanto que la longitud de onda ha aumentado muchísimo (figura 13) y se han convertido en fotones mucho más fríos, que transmiten una energía de sólo 2,7 grados Kelvin. Es la llamada radiación de fondo de microondas (Cosmic Microwave Background o CMB).

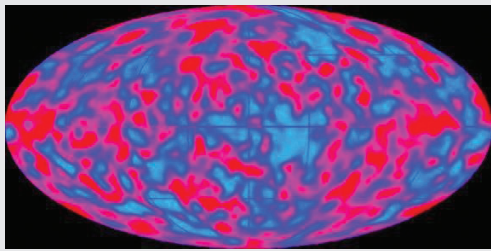


Fig. 14a: Imagen del COBE.

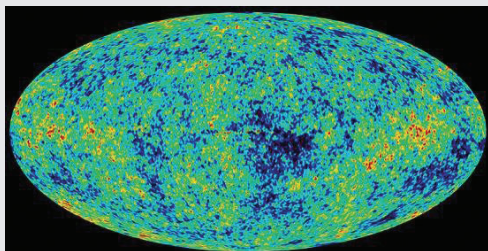


Fig. 14b: Imagen del WMAP.

Esta radiación de fondo fue detectada por primera vez en 1964 por Penzias y Wilson, en Estados Unidos. Estaban intentando eliminar todos los ruidos parásitos en su radiotelescopio cuando captaron una emisión de 7,35 cm de longitud de onda que siempre estaba presente, independientemente de la zona hacia la que apuntara la gigantesca antena. Se revisó toda la instalación, e incluso se pensó en que unos pájaros que anidaron en la antena podían ser los causantes, pero no se pudo eliminar ese ruido de fondo. Se llegó a la conclusión de que procedía de un cuerpo emisor que tenía una temperatura de 2,7 Kelvin —la temperatura actual del Universo— y que no se encontraba en ningún lugar determinado, sino en todos: era el Universo mismo el que emitía aquella radiación de fondo, como una reliquia del Big Bang. Son emisiones en el campo de las microondas, similares a las de los hornos caseros, pero con muy poca energía: sólo podría calentar los alimentos a 2,7 K.

Aunque parecía una radiación extraordinariamente uniforme, G. Smoot, R. Mather y otros colegas suyos lograron apreciar ligerísimas variaciones en las mediciones que hizo el satélite COBE (figura 14a), del orden de millonésimas de grado. De for-

ma simultánea se detectaron esas fluctuaciones desde tierra en el llamado experimento de Tenerife, en el Instituto de Astrofísica de Canarias. Y en el año 2001 la NASA lanzó el telescopio WMAP, para estudiar esa radiación de fondo con bastante más resolución (figura 14b).

Aunque pequeñas, esas ligeras variaciones son las huellas de los grumos de materia a partir de los



Fig. 15: Algunos de los puntos de una pantalla de televisión analógica no sintonizada provienen del fondo de microondas.

cuales se empezaron a formar las galaxias. Aún no sabemos qué fue lo que originó esas fluctuaciones de densidad. Lo que sí podemos afirmar es que esas arrugas en la materia se produjeron, y empezaron a producirse las condensaciones de las proto-galaxias, cuando habían pasado sólo unos cientos de millones de años desde el Big Bang. Casi

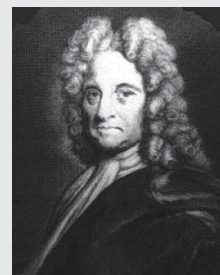


Fig. 16a: Johannes Kepler. Fig. 16b: Edmund Halley.



Fig. 16c: Heinrich Olbers. Fig. 16d: Edgar Allan Poe.

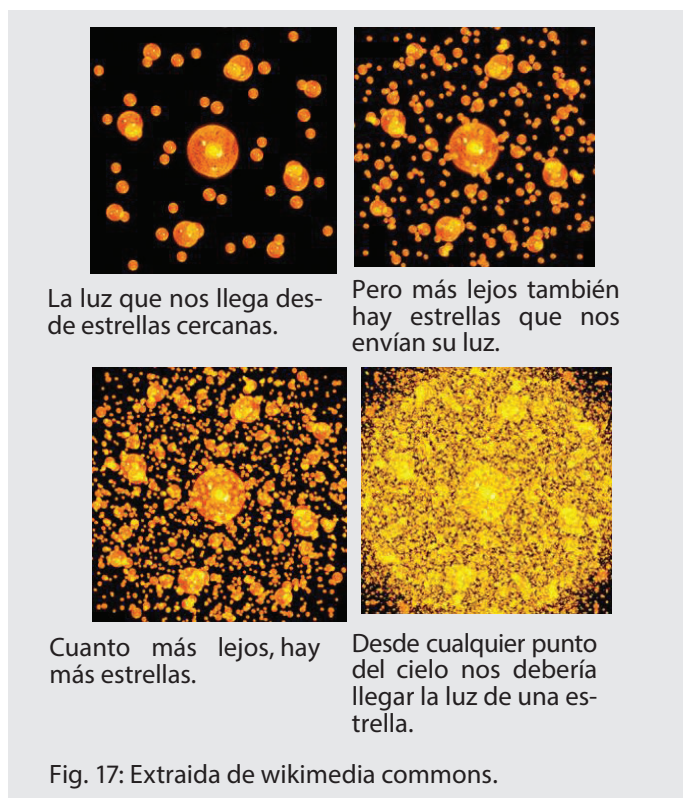
¹ En "Eureka", ensayo científico publicado en febrero de 1848 daba la siguiente explicación a los "vacíos" oscuros observados entre las estrellas: "Podríamos comprender los vacíos que nuestros telescopios encuentran en innumerables direcciones suponiendo que la distancia hasta el fondo invisible es tan inmensa que ningún rayo de luz procedente de allí ha sido todavía capaz de alcanzarnos".

a la vez se debieron formar las primeras estrellas en esas galaxias primitivas.

Actividad 7: Detección de la radiación de fondo de microondas

Alrededor de 300.000 años después del Big Bang, los fotones se separaron de la materia y empezaron a viajar libres por el Universo. Al expandirse el espacio, esos fotones fueron ampliando su longitud de onda. Según los cálculos, ahora tendrían una longitud de onda de unos 2 mm, que corresponde a la región de las microondas, y equivale a la que emitiría un cuerpo negro que estuviera a 2,7 grados Kelvin.

Como se ha mencionado antes Penzias y Wilson, en 1964 detectaron por primera vez la radiación de fondo de microondas, una radiación fósil que procede muy uniformemente de todas direcciones.



También nosotros podemos detectar esa radiación de fondo con un simple televisor (figura 15). Para ello, sintoniza el televisor en un canal analógico vacío. La imagen está compuesta de multitud de puntos cambiantes continuamente. Aproximadamente un 10 %, es decir, uno de cada diez proviene de la radiación de fondo del Universo.

¿Por qué es oscura la noche?

Este era el título de un interesante artículo que el alemán Heinrich Olbers publicó en 1823. Anteriormente ya se lo había planteado Kepler en 1610 como demostración de que el Universo no podía ser infinito. Edmund Halley, un siglo después

encontró en el firmamento algunas zonas especialmente brillantes y propuso que el cielo no brilla uniformemente durante la noche porque -a pesar que el Universo es infinito- las estrellas no se distribuían de manera uniforme. Incluso el escritor Edgar Allan Poe (1809-49), escribió sobre este fenómeno. Sin embargo el tema pasó a la historia como la Paradoja de Olbers.

La respuesta parece trivial, pero no es así después de leer el artículo del alemán. El razonamiento al que apuntaba Olbers llevaba a la paradoja de que el cielo nocturno debía ser tan brillante como el más esplendoroso día. Veamos su argumento.

Olbers partía de los siguientes principios:

- 1.- El Universo tiene una extensión infinita.
- 2.- El número de estrellas se distribuye más o menos uniformemente a lo largo de todo el Universo.
- 3.- Todas las estrellas tienen una luminosidad media similar a lo largo y ancho del Universo.

Miremos al Universo desde la Tierra. Supongamos una primera capa esférica de estrellas en la bóveda celeste, a una distancia R_1 . El número de estrellas que contiene será N_1 . Supongamos una segunda capa esférica a una distancia mayor R_2 . Cada una de sus estrellas nos ilumina menos por estar más lejos, pero a la vez esa capa es mayor y contiene más estrellas, según el principio nº 2, y se contrarresta la menor iluminación (la intensidad de la luz disminuye proporcionalmente a $1/R^2$, y el área de la capa, y por tanto el número de estrellas, aumenta proporcionalmente a R^2). La conclusión es que la segunda capa ilumina a la Tierra exactamente igual que la primera. Y como según el principio nº 1 hay infinitas capas, la conclusión es que el cielo debería aparecer brillante durante la noche.

Otra forma de plantearlo: si observamos de noche el cielo, como hay infinitas estrellas, miremos hacia donde miremos, nuestra visual siempre debería acabar topando con la superficie de una estrella, y por lo tanto deberíamos ver allí un punto brillante. Y si eso ocurre en todo el cielo, debería aparecer totalmente brillante.

Evidentemente esto no es así. Esta paradoja de Olbers desató muchas controversias y no se pudo resolver correctamente hasta comienzos del siglo XX, con la teoría del Big Bang. El razonamiento en sí es correcto, pero fallan los principios de los que parte. En efecto, la luz de las estrellas lejanas, al estar el Universo en expansión sufren un corri-

miento hacia el rojo tanto más intenso cuanto más lejos están. Eso conlleva un debilitamiento en la intensidad de su radiación, por lo que el principio nº 3 de Olbers no es correcto. Pero sobre todo, también sabemos que cuanto más lejos esté una estrella, la luz que nos llega partió antes, es decir, la vemos como era hace tiempo. Las más lejanas que podríamos observar son las que se formaron poco después del Big Bang, pero más allá no podemos observar nada más, por lo que no hay infinitas capas de estrellas, o sea, también es falso el principio nº 1 de Olbers.

En el siglo XX, la solución a la paradoja de Olbers quedó resuelta con la expansión y sobre todo con la edad no infinita del Universo. ¡Afortunadamente, la noche podía seguir siendo oscura!

Lentes gravitacionales

La luz siempre sigue el camino más corto posible entre dos puntos. Pero si una masa está presente, el espacio se curva, y entonces el camino más corto posible es una curva como se puede ver en la figura 18a. Esta idea no es difícil para los estudiantes. Realmente podemos mostrárselo sobre un globo terrestre (figura 18c). Evidentemente ellos pueden entender que sobre la superficie de la Tierra las distancias entre dos puntos son siempre según una curva.

En general, podemos imaginar las lentes gravita-



Fig. 18a y 18b: Si el espacio es curvo, el camino más corto entre dos puntos es una curva.



Fig. 18c: El camino más corto sobre la superficie terrestre no es una recta.

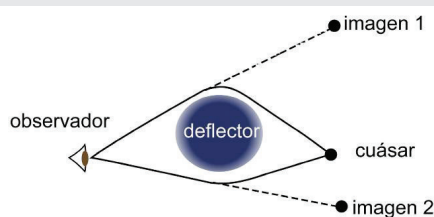


Fig. 19a: Al observador le parece que le llegan rayos luminosos desde dos lugares distintos, y ve dos imágenes.

cionales como una lente ordinaria, pero en la que la desviación de la luz es producida por una gran masa que hay en el camino de la luz, llamada deflector (figura 19a).

Las lentes gravitacionales producen una curvatura en los rayos de luz que hace que los objetos, si son puntuales (estrellas o cuásares) parezcan estar en un lugar diferente a donde están realmente o incluso se producen imágenes múltiples del objeto (figura 19b). Si los objetos son extensos (como las galaxias), las imágenes aparecen deformadas como arcos brillantes (figuras 20a, 20b y 20c).

Actividad 8: Simulación de lente gravitacional con una copa de vino.

Podemos simular una lente gravitacional utilizando una copa de vino. El experimento permite “mostrar” cómo la materia puede introducir deformaciones en las imágenes observadas.

Es fácil comprobar que esta simulación da lugar a la “deformación del espacio” que se observa. Basta situar la copa sobre un papel milimetrado y observar a través del vino blanco (o zumo de manzana) y ver esta deformación (figuras 21a y 21b).

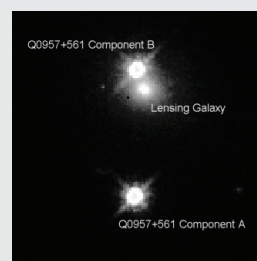


Fig. 19b: Fotografía de la imagen doble del Cuásar Q0957+561. El deflector es la galaxia cercana al componente B.

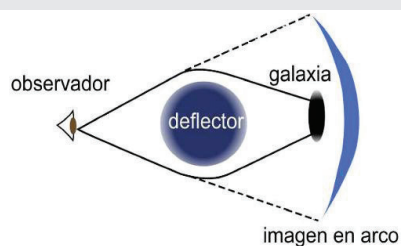


Fig. 20a: Si el cuerpo desviado es un objeto extenso, las imágenes obtenidas son un conjunto de arcos brillantes o un anillo completo.



Fig. 20b: Arcos luminosos gigantes formados por el cúmulo de galaxias Abell 2218.

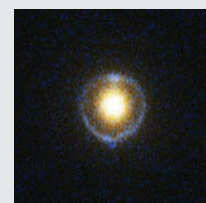


Fig. 20c: Anillo completo de una galaxia que está detrás del deflector brillante.

Veamos ahora cómo simular el anillo de Einstein o la multiplicidad de imágenes. Es suficiente tomar una linterna, situarla al otro lado de la copa de vino tinto y ver el rayo de la luz que pasa a través de ella. Podemos ver y mover de derecha a izquierda y de arriba a abajo la luz de la linterna. Observamos que la luz, en general, no es puntual: se producen imágenes repetidas y en algunos casos algunos arcos. Esto es a consecuencia de que la copa actúa como un lente que deforma la trayectoria de la luz. En particular podemos observar a veces una figura amorfa, o un punto rojo brillante, cuatro puntos rojos o un arco entre los puntos rojos (figuras 22a, 22b y 22c).

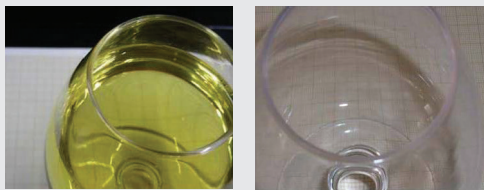


Fig. 21a y 21b: Sólo podemos ver la deformación de la cuadrícula si la copa está llena.



Fig. 22a: La luz de la linterna se ve un arco entre dos puntos brillantes rojos, Fig. 22b: como una figura amorfa, y Fig. 22c: la cruz de Einstein.

También podemos simular la lente gravitacional mirando a través del pie de una copa. Si ponemos el pie de la copa sobre un papel milimetrado y observamos a través de él, podemos ver la deformación de la cuadrícula (figura 23).



Fig. 23: Deformación de la cuadrícula.



Fig. 24a, 24b y 24c: El pie de copa es un simulador de diversos objetos: segmentos de arco, imágenes de la cruz y anillo de Einstein

Moviendo lentamente de derecha a izquierda el pie de la copa sobre un objeto, por ejemplo un círculo rojo de unos 3 cm, iremos reproduciendo los diferentes objetos reales observados en las lentes gravitacionales (figuras 24a, 24b y 24c).

Bibliografía

- Moreno, R. Experimentos para todas las edades, Ed. Rialp, Madrid, 2008.
- Moreno, R. Taller de Astrofísica, Cuadernos ApEA, Antares, Barcelona, 2007.
- Moreno, R. Historia Breve del Universo, Ed. Rialp, Madrid, 1998.
- Moreno, A, Moreno, R. Taller de Astronomía, Ediciones AKAL, Madrid, 1996.
- Riaza, E, Moreno, R. Historia del comienzo: George Lemaître, padre del Big Bang, Ediciones Encuentro, Madrid, 2010.
- Ros, R.M, Experiments and exercises involving gravitational lenses, Proceedings 1st ESO-EAAE Astronomy Summer School, Barcelona 2007.
- Ros, R.M, Gravitational lenses in the classroom, Physics Education, 43, 5, 506, 514, Oxford, 2008.

Fuentes Internet

- <http://www.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/index.shtml>
- <http://www.dsi.uni-stuttgart.de>
- <http://georgeslemaitre.blogspot.com/>
- <http://www-ra.phys.utas.edu.au/~jlovell/simlens>
- <http://leo.astronomy.cz/grlens/grl0.html>

Planetas y exoplanetas

Rosa M. Ros, Hans Deeg

International Astronomical Union, Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España)
Instituto de Astrofísica de Canarias y Universidad de La Laguna (Canarias, España)

Resumen

Este taller se divide en dos partes. En primer lugar se presentan actividades para ayudar a comparar los diferentes planetas entre sí. Se pretende dar contenido a las tablas de datos para que no queden como fríos datos sin más. Para ello se presentan modelos del Sistema Solar desde diferentes tipos de vista: distancias, diámetros, densidades, gravedades superficiales, etc.

En la segunda parte se considera Júpiter y sus satélites galileanos es un buen modelo de un “pequeño sistema planetario” y es estudiado mediante el uso de un conjunto de fotografías que han sido tomadas con anterioridad.

En la actualidad, varios métodos se utilizan para encontrar exoplanetas, más o menos indirectamente. Ha sido posible detectar más de 30 sistemas planetarios múltiples. Vamos a compararlos, de alguna manera, con el Sistema Solar y los satélites galileanos de Júpiter.

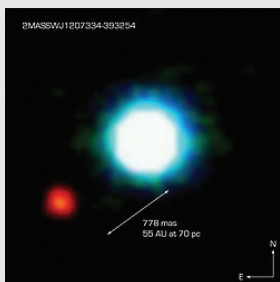


Fig. 1: El primer planeta 2M1207b observado directamente. Fotografiado el 16 de marzo de 2003. Tiene una masa de 3,3 veces la masa de Júpiter y orbita a 41 UA de la enana marrón. En 2006, un disco de polvo se encuentran alrededor de la estrella madre, proporcionando evidencia de una formación de los planetas sobre el mismo que una estrella normal (Foto: ESO).

Objetivos

- Comprender que significan los valores numéricos que resumen las tablas de datos de los planetas del Sistema Solar
- Deducir el radio y el periodo de rotación de los satélites galileanos de Júpiter mediante el uso de un conjunto de observaciones fotográficas.
- Calcular la masa de Júpiter usando la tercera ley de Kepler.
- Entender las principales características de los sistemas planetarios extra-solares mediante un para-

lelismo establecido con Júpiter y sus satélites galileanos.

El Sistema Solar y las tablas de datos

El Sistema Solar permite aventurar a los alumnos a

Planeta	Diámetro (km)	Distancia al Sol (km)
Sol	1.392.000	
Mercurio	4.878	57,9 10 ⁶
Venus	12.180	108,3 10 ⁶
Tierra	12.756	149,7 10 ⁶
Marte	6.760	228,1 10 ⁶
Júpiter	142.800	778,7 10 ⁶
Saturno	120.000	1.430,1 10 ⁶
Urano	50.000	2.876,5 10 ⁶
Neptuno	45.000	4.506,6 10 ⁶

Tabla 1: Datos de los cuerpos del Sistema Solar

realizar comparaciones entre los diferentes planetas lo que les llevara a elaborar maquetas comparando diferentes aspectos. Para poder llevar a cabo este cometido hay que usar los datos de la tabla 1.

En todas las ocasiones el principal objetivo del modelo es hacer que sean comprensibles los datos. Los millones de km no son fácilmente imaginables, en cambio si se traducen a distancia y tamaño que ellos suelen manejar son más asequibles.

Varias maquetas del Sistema Solar

Maquetas de diámetros

En un papel suficientemente grande de color amarillo, se recorta un círculo que representará el Sol. Los diferentes planetas se recortaran en cartulina y se dibujaran sus características morfológicas. Finalmente se pegarán todos ellos sobre el disco solar.

A continuación figuran los resultados obtenidos con una escala de 1cm por cada 10.000 km: Sol 139 cm, Mercurio 0.5cm, Venus 1.2 cm, la Tierra 1.3 cm, Marte 0.7 cm, Júpiter 14.3 cm, Saturno 12.0 cm, Urano 5.0 cm y Neptuno 4.9 cm.



Fig. 2a y 2b: Ejemplos de camiseta que proporcionan comparaciones a escala entre los diámetros del Sol y los planetas.

Sugerencia: la maqueta anterior puede realizarse pintando las planetas sobre una camiseta, eso sí siempre a escala. Resulta más atractivo si se pintan algunos detalles.

Maqueta de distancias

Si atendemos solo a las distancias entre los planetas se puede elaborar otra maqueta que es fácil situar en cualquier pasillo de la escuela. Basta cortar una cartulina a tiras de 10 cm de ancho, que iremos uniendo hasta tener una larga cinta de varios metros (figura 3). A continuación, se pegan a la distancia que les corresponde el nombre de los diferentes planetas.



Fig. 3: Maqueta de distancias.

Si se usa una escala de 1cm para cada 10 millones de km los resultados obtenidos son Mercurio 6 cm, Venus 11 cm, la Tierra 15 cm, Marte 23 cm, Júpiter 78 cm, Saturno 143 cm, Urano 288 cm y Neptuno 450 cm.

Una opción simpática para este modelo consiste en usar un rollo de papel higiénico utilizando las porciones señaladas en el mismo como unidades. Por ejemplo, se puede tomar como escala 1 porción de papel para cada 20 millones de km.

Maqueta de diámetros y distancias

El siguiente desafío consiste en intentar hacer una maqueta que represente los cuerpos a escala y a la distancia correspondiente. El problema es que no es tan sencillo como puede parecer encontrar una escala que permita representar los planetas por objetos no demasiado pequeños y que las distancias entre ellos no sean exageradamente grandes, ya que en ese caso no son representables y el modelo es poco útil para los alumnos porque no puede asimilarlo suficientemente bien. A título de sugerencia es una buena idea usar el patio del centro para hacer el modelo y usar pelotas para los planetas ya que hay de cualquier diámetro.

A modo de ejemplo damos una posible solución. En un extremo del patio situamos una pelota de baloncesto de unos 25 cm de diámetro que representa el Sol. Mercurio será la cabeza de una aguja de pizar (1 mm de diámetro) situado a 10 m del Sol. La cabeza, algo mayor, de otra aguja de pizar (2 mm de diámetro) será Venus a 19 m del Sol, La Tierra es la cabeza de otra aguja como la anterior (2 mm) a 27 m del Sol. Marte es otra cabeza de aguja,



Fig. 4: El Sol y los planetas de la maqueta de diámetros y distancias.

algo menor (1mm) situado a 41 m del Sol. Normalmente aquí se acabo el patio de la escuela, si es que no se terminó antes. Los siguientes planetas habrá que situarlos en otros lugares fuera del patio, pero al ser próximo a la escuela los alumnos conocen bien las distancias. Una pelota de ping-pong (2.5 cm de diámetro) corresponde a Júpiter a 140 m del Sol. Otra pelota de ping-pong (2 cm de diámetro) será Saturno a 250 m del Sol, una canica de cristal (1 cm de diámetro) representará Urano a 500m del Sol y otra canica (1 cm) situada a 800m será Neptuno.

Hay que hacer hincapié en que este sistema planetario no cabe en ninguna escuela. Pero hay que

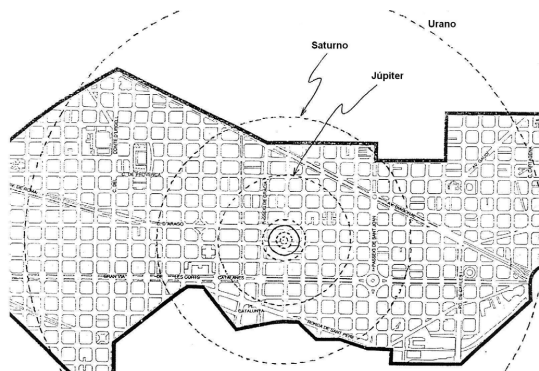


Fig. 5: Mapa del Ensanche de Barcelona con algunos planetas.

considerar que si reducimos las distancias, los planetas serían más pequeños que la cabeza de una aguja de picar y prácticamente serían imposibles de visualizar. Para terminar podéis calcular cuál es la escala que se ha utilizado para elaborar este modelo.

Maqueta en el plano de la ciudad

La idea es sencilla, usar la escala de un mapa para imaginar en la ciudad donde está situada la escuela la posición de los diferentes planetas si



Fig. 6a y 6b: Instantáneas de la ciudad de Metz.

el Sol está situado en la puerta del centro escolar. A modo de ejemplo se presenta el plano de Barcelona con diferentes objetos (concretamente frutas y legumbres) que estarían situados en las diferentes calles para así poder imaginar mejor las dimensiones. Como ejercicio se sugiere hacer el mismo trabajo con el plano de la propia ciudad.

En el plano de la figura, Mercurio es un grano de caviar, Venus y la Tierra un par de guisantes, Marte un grano de pimienta, Júpiter una naranja, Saturno una mandarina y Urano y Neptuno un par de nueces, y el Sol, como no hay ninguna esfera vegetal suficientemente grande los propios alumnos lo imaginaron como una esfera del tamaño de un lavavajillas. Cualquier lector puede hacer lo mismo con su propia ciudad.

En la ciudad de Metz (Francia) hay un Sistema Solar dispuesto a través de sus calles y plazas, con los

correspondientes planetas acompañados de paneles de información para el transeúnte.

Maqueta de distancias-luz

En astronomía, es usual usar el año luz como unidad de medida. Esta misma idea puede ser ilustrativa para un modelo del Sistema Solar. Basta considerar la velocidad de la luz $c = 300.000$ km/s. Por lo tanto, la distancia que corresponde a 1 segundo luz es de 300.000 km. Por ejemplo, para la Luna que está situada a 384.000 km, el tiempo que tarda la luz en llegar de la Luna a la Tierra es $384.000/300.000 = 1,3$ segundos.

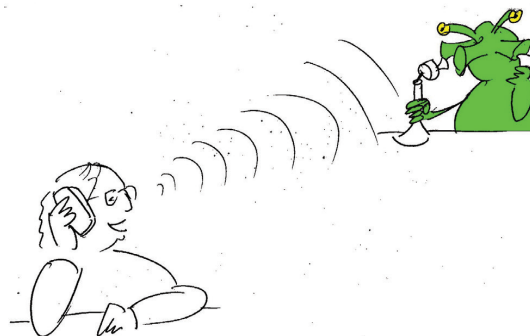


Fig. 7: Otro ejemplo de modelo

Usando estas unidades se solicitará a los alumnos que calculen el tiempo necesario para que la luz del Sol llegue a cada uno de los planetas del Sistema Solar. (A modo de solución añadimos el tiempo que tarda la luz del Sol en llegar a Mercurio es de 3,3 minutos, a Venus 6,0 minutos, a la Tierra 8,3 minutos, a Marte 12,7 minutos, a Júpiter 43,2 minutos, a Saturno 1,32 horas, a Urano 2,66 horas y a Neptuno 4,16 horas). Podemos proponerles que se imaginen como sería una conversación por video-conferencia entre el Sol y cualquier planeta.

Introducimos aquí también la distancia a la estrella más cercana, ya que es muy útil para visualizar las enormes distancias a otras estrellas, que es la razón por qué es tan difícil de detectar planetas extrasolares. La más cercana a nosotros es Alfa Centauri a una distancia de 4,37 años luz o $4,13 \cdot 10^{13}$ kilómetros. Se puede pedir a los estudiantes que calculen la distancia a esta estrella en cualquiera de los modelos de sistemas planetarios que se han mencionado anteriormente. En el "modelo patio de la escuela", con una escala de 1 cm por 56.000 kilómetros, la estrella sería a una distancia de 7.375 kilómetros!

Modelo de tamaños aparentes del disco solar desde cada planeta

Desde un planeta, por ejemplo la Tierra, el Sol se ve bajo un ángulo α (figura 8). Para valores de α

(figura 8). Para valores de α muy pequeños, se toma $\tan \alpha \approx \alpha$ (en radianes).

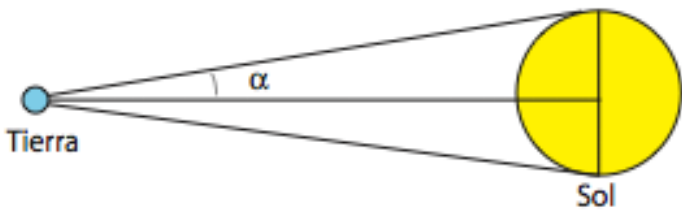


Fig. 8: Desde la Tierra el Sol se ve bajo un ángulo α .

Sabiendo que el diámetro solar es de $1,4 \cdot 10^6$ km o sea un radio de $0,7 \cdot 10^6$ km, y que la distancia Tierra-Sol es $150 \cdot 10^6$ km, se deduce:

$$\alpha \approx \text{tg}\alpha = \frac{0,7 \cdot 10^6}{150 \cdot 10^6} = 0,0045 \text{ radianes}$$

Y en grados:

$$\frac{0,0045 \times 180}{\pi} = 0,255^\circ$$

Es decir, desde la Tierra, el Sol se ve del tamaño 2 veces $0,255^\circ = 0,51^\circ$, esto es, aproximadamente, medio grado. Repitiendo el mismo proceso para cada planeta se obtienen los resultados de la siguiente tabla 2 y se puede representar su tamaño (figura 9).

Planetas	$\tan \alpha$	α (°)	α (°)aprox
Mercurio	0,024	1,383	1,4
Venus	0,0129	0,743	0,7
Marte	0,006	0,352	0,4
Júpiter	0,0018	0,1031	0,1
Saturno	0,000979	0,057	0,06
Urano	0,00048	0,02786	0,03
Neptuno	0,0003	0,0178	0,02

Tabla 2: Resultados para los distintos planetas.

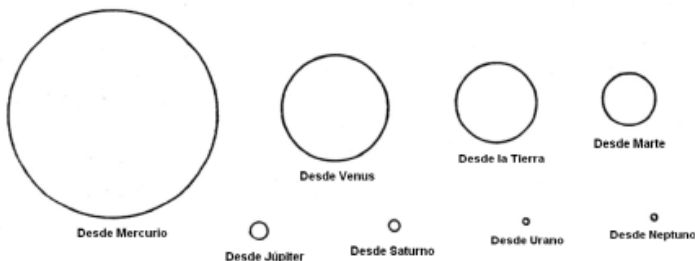


Fig. 9: El Sol visto desde cada planeta: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno.

Modelo de densidades

El objetivo de este modelo consiste en buscar muestras de materiales que sean fácilmente manipulables y que tengan una densidad similar a cada uno de los cuerpos del Sistema Solar, para así poder “sentirlos en las manos”.

Planetas	Densidad (g/cm³)
Sol	1,41
Mercurio	5,41
Venus	5,25
Tierra	5,52
Luna	3,33
Marte	3,9
Júpiter	1,33
Saturno	0,71
Urano	1,3
Neptuno	1,7

Tabla 3: Densidades de los cuerpos del Sistema Solar.



Fig. 10: Modelo de densidades.

Minerales	Densidad	Otros materiales	Densidad
Yeso	2,3	Glicerina	1,3
Ortosa	2,6	Corcho	0,24
Azufre	1,1-2,2	Aluminio	2,7
Alita	2	Hierro	7,86
Cuarzo	2,65	Cemento	2,7 - 3,1
Bórax	1,7	Vidrio	2,4 - 2,8
Blenda	4	Estaño	7,3
Pirita	5,2	Arcilla	1,8 - 2,5
Hematíes	5,4	Baquelita	1,25
Calcita	2,7	Madera de roble	0,90
Galena	7,5	Madera de pino	0,55

Tabla 4: Ejemplos de densidades de algunos materiales.

Partiendo de la tabla 3 de densidades de los planetas, basta comparar con las densidades de diversos minerales (en todas las escuela suele haber una colección de materiales) o en algunos casos usar muestras de otros materiales fáciles de encontrar como el vidrio, cerámica, madera, plásticos, etc. A continuación presentamos la tabla 4 con algunos ejemplos de densidades orientativas de algunos materiales. En caso de utilizar otro tipo de material que no figure en la tabla 4, es muy fácil calcular su densidad.

Basta tomar una porción de este material, pesarlo para conocer m e introducirlo en un recipiente de agua y medir su volumen V . La densidad d del material será,

$$d = \frac{m}{V}$$

Por cierto hay que hacer notar a los alumnos que Saturno “fl taría” en el agua, su densidad es menor que 1.

Modelo de achatamiento de los planetas

Para visualizar la deformación (achatamiento) de los planetas gaseosos debido a la fuerza centrífuga generada por su rotación construiremos un sencillo modelo.



Fig. 11: Modelo para simular el achatamiento.

Tal como se puede ver en la figura 11, con un palo y unas tiras de cartulina se puede construir este sencillo modelo que al girar reproduce el achatamiento que tiene lugar en los planetas del Sistema Solar.

1. Recortad unas tiras de cartulina de 35x1 cm.
2. Las sujetáis a un palo cilíndrico de 50 cm de largo y 1 cm de diámetro, procurando que por la



Fig. 12a, 12b y 12c: Simulando el movimiento circular de los planetas.

Planeta	Período Orbital (días)	Distancia al Sol (km)	Velocidad orbital media (km/s)
Mercurio	87.97	$57.9 \cdot 10^6$	47.87
Venus	224.70	$108.3 \cdot 10^6$	35.02
Tierra	365.26	$149.7 \cdot 10^6$	29.50
Marte	686.97	$228.1 \cdot 10^6$	24.13
Júpiter	4331.57	$778.7 \cdot 10^6$	13.07
Saturno	10759.22	$1\,430.1 \cdot 10^6$	9.67
Urano	30.799.10	$2\,876.5 \cdot 10^6$	6.84
Neptuno	60190.00	$4\,506.6 \cdot 10^6$	5.48

Tabla 5: Datos de los cuerpos del Sistema Solar

parte superior no puedan subir o bajar, mientras que en la parte inferior puedan desplazarse con libertad a lo largo del palo.

3. Hacedlo girar situándolo entre las dos manos y haciendo un rápido movimiento de rotación en un sentido y otro. Veréis como la fuerza centrífuga deforma las bandas de cartulina (figura 11) de la misma forma que actúa sobre los planetas.

Modelo sobre periodos orbitales planetarios

Es bien sabido que no todos los planetas recorren su órbita con la misma velocidad (tabla 5). Conocido el período y la distancia media al Sol se puede deducir la velocidad orbital media del planeta al recorrer su órbita. Veamos a modo de ejemplo el caso de la Tierra, pero se puede repetir el mismo razonamiento para cualquier otro planeta.

La distancia de recorrido de una revolución orbital es $L = 2 \pi R$, con lo cual la velocidad orbital media es $v = L/T = 2 \pi R / T$. Para la Tierra, el periodo es de 365 días, entonces $v = 2,582.750 \text{ km/día} = 107.740 \text{ km/h} = 29,9 \text{ km/s}$, donde la distancia de la Tierra al Sol $R = 150.10^6 \text{ km}$, se deduce, para la Tierra, que su velocidad orbital media es $v = 29,9 \text{ km/s} = 107.589 \text{ km/h}$. Es bueno hacer hincapié en que además el Sol gira en torno al centro galáctico con una velocidad de 220 km/s o lo que es lo mismo de 800.000 km/h .

El más rápido es Mercurio y el más lento Neptuno, el más alejado. Ya los romanos habían observado que Mercurio era el más rápido de todos y por eso lo identificaron con el mensajero de los dioses y lo representaban con alas en los pies. Observado a simple vista, el desplazamiento de los planetas observables sin ayuda óptica es fácil comprobar que Júpiter y Saturno se mueven mucho más lentamente sobre las constelaciones zodiacales que lo puede hacer Venus o Marte por ejemplo.

Esta es una sencilla experiencia de la relación entre la distancia y el periodo orbital.

Comenzamos por atar un objeto pesado, tal como una tuerca, al final de un trozo de cuerda. Sujetamos el extremo opuesto al objeto pesado y hacemos girar el objeto en un movimiento circular por encima de nuestras cabezas. A continuación, podemos ver que si liberamos la cuerda (haciendo que sea más larga), a medida que se hace girar el objeto va a necesitar más tiempo para completar

un período orbital cuanto más larga sea la cuerda. Por el contrario, si tomamos la cuerda más corta, al girar tardará menos tiempo en dar la vuelta.

A continuación, podemos desarrollar un modelo del sistema solar con tuercas y trozos de cuerda de longitud proporcional a los radios de las órbitas planetarias (suponiendo, de nuevo, una órbita circular para todos ellos). Sin embargo, en lugar de cortar una pieza separada para cada planeta, cortado todas las piezas de una longitud de unos 20 cm. Luego, utilizando la escala adecuada, mida la distancia correcta del objeto pesado y hacer un nudo en este punto. A continuación, la cuerda puede ser retenida en el lugar del nudo mientras se hace girar el objeto pesado.

Para utilizar el modelo que debe tener una de las cuerdas en la ubicación del nudo y darle la vuelta la cabeza en un plano paralelo al suelo, con la posible velocidad mínima velocidad que lo mantendrá en órbita. Veremos que el objeto necesita menos tiempo para una rotación completa cuando el radio es más pequeño.

Modelo de gravedades superficiales

La fórmula de la fuerza gravitacional

$$F = G \cdot \frac{M \cdot m}{d^2}$$

permite calcular la gravedad superficial que actúa sobre la superficie de cualquier planeta. Basta considerar la masa unidad ($m = 1$) sobre la superficie del planeta ($d = R$), obtenemos

$$g = \frac{G \cdot M}{R^2}$$

donde $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ es la constante de la gravitación universal. Si nosotros sustituimos la masa del planeta por $M = 4/3 \pi R^3 \rho$, donde ρ es la densidad y R el radio del planeta, entonces:

$$g = \frac{4}{3} \pi \cdot G \cdot \rho \cdot R$$

Sustituyendo estas dos últimas variables ρ y R por los valores listados en la tabla 6 (después de convertir el radio en metros y la densidad en kg / m^3 , con $1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ g} / \text{cm}^3$), se puede calcular el valor de la gravedad en la superficie g de todos los planetas.

Veamos un par de ejemplos,

$$g_{\text{mercurio}} = 4/3 \pi G \cdot 2439 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot 5400 \text{ kg/m}^3 = 3,7 \text{ m/s}^2$$

$$g_{\text{venus}} = 4/3 \pi G \cdot 6052 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot 5300 \text{ kg/m}^3 = 8,9 \text{ m/s}^2$$

Planeta	R Radio ecuatorial (km)	g Gravedad sup.	ρ Densidad
Mercurio	2.439	0,378	5,4
Venus	6.052	0,894	5,3
Tierra	6.378	1,000	5,5
Marte	3.397	0,379	3,9
Júpiter	71.492	2,540	1,3
Saturno	60.268	1,070	0,7
Urano	25.559	0,800	1,2
Neptuno	25.269	1,200	1,7

Tabla 6: Gravedad superficial y densidades de los cuerpos del Sistema Solar.

Del mismo modo, podemos calcular g para el resto de los planetas. Al igual que en la tabla 7, las gravedades superficiales se dan a menudo en relación con la de la Tierra, y indican con la letra g .

Modelo de las básculas de baño

En este caso el modelo consiste en preparar un conjunto de 9 básculas de baño (8 planetas y la Luna) para que los estudiantes, al pesarse en ellas, puedan saber que es lo que pesarían en cada uno de los planetas.

Evidentemente que es preciso repetir exactamente el mismo proceso para cada planeta así es que solamente se explicará una de ellos. La idea, esencialmente, es abrir una báscula de baño y sustituir el disco de los pesos por otro con los nuevos pesos que se marcaran sobre el círculo calculando el peso equivalente al terrestre mediante una simple proporción.

1. Primero hay que abrir la báscula. En la mayoría de modelos hay dos muelles que fijan la base. Recordad que hay que volver a montarlo de nuevo (figuras 13a y 13b).

2. Una vez abierta hay que sustituir, o poner encima, el disco de pesos "terrestre" por el que habréis dibujado después de hacer los cálculos de los pesos equivalentes en el otro planeta.

3. En la tabla siguiente hay las gravedades superficiales de la Luna y los diferentes planetas del Sistema Solar. En una columna figuran en valores absolutos ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) y en la otra en valores relativos respecto a la gravedad terrestre. Estos valores son los que hay que aplicar a las unidades de peso "terrestres" de la báscula para convertirlos en los valores correspondientes a otro planeta (solo hay que hacer una proporción o regla de tres).

4. Finalmente, hay que volver a cerrar la báscula y ya podéis comprobar lo que pesáis en la Luna.

Planeta	Gravedad ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	Gravedad ($T=1$)
Luna	1,62	0,16
Mercurio	3,70	0,37
Venus	8,87	0,86
Tierra	9,80	1,00
Marte	3,71	0,38
Júpiter	23,12	2,36
Saturno	8,96	0,91
Urano	8,69	0,88
Neptuno	11,00	1,12

Tabla 7: Gravedades superficiales para cada cuerpo del Sistema Solar.



Fig.13a y 13 b: Báscula de baño con el disco substituido.



Fig. 14: Modelo del Sistema Solar con básculas de baño.

Modelos de cráteres

La mayoría de cráteres del Sistema Solar no tienen origen volcánico sino que son resultado de la caída de fragmentos sólidos del espacio sobre la superficie de los planetas y satélites.

1. Primero ha que recubrir el suelo con periódicos viejos, para no ensuciar el suelo.

2. Poner dentro de una bandeja una capa de 2-3 cm de harina, distribuyéndola con un colador para que la superficie quede muy lisa.

3. Poner una capa de unos pocos milímetros de cacao en polvo sobre la harina con la ayuda de un colador (figura 15a).

4. Desde una altura de unos 2 metros dejamos caer el proyectil: una cucharada sopera de cacao en polvo. Al caer dejara marcas similares a los cráteres de impacto (figura 15b).

5. Se puede experimentar variando la altura. El tipo, la forma o la masa de los proyectiles, etc. Se puede conseguir incluso el pico central.



Fig. 15a: Simulando cráteres

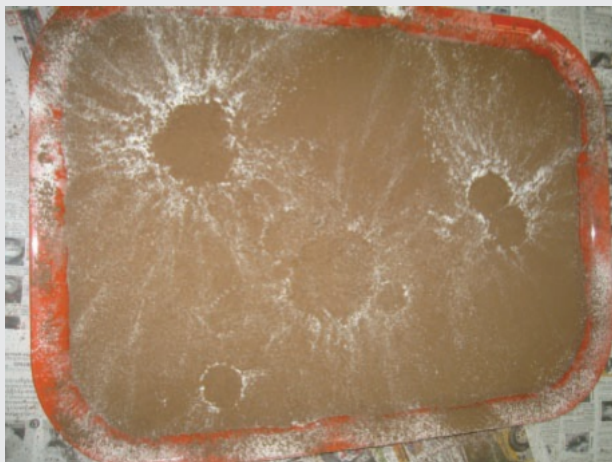


Fig. 15b: Cráteres resultantes

Modelos de velocidades de escape

Si la velocidad de lanzamiento de un cohete no es muy grande, la fuerza de atracción del propio planeta lo hace caer de nuevo sobre su superficie. Si la velocidad de lanzamiento es suficientemente grande se escapa del campo gravitatorio del planeta. Veamos cual es la velocidad límite por encima de la cual el cohete podrá escapar, es decir la velocidad mínima de lanzamiento o velocidad de escape.

Considerando las fórmulas del movimiento uniformemente acelerado,

$$e = \frac{1}{2} at^2 + v_0 t$$

$$v = at + v_0$$

si sustituimos la aceleración por g y se considera la velocidad inicial v_0 nula, tenemos que sobre la superficie del planeta se verifica $R = \frac{1}{2} gt^2$ y,

como además, $v = gt$. Eliminando el tiempo entre ellas,

$$v = \sqrt{2gR}$$

Donde se sustituyen los valores de g y R por los que figuran en la tabla 8 para calcular la velocidad de escape del planeta considerado.

A modo de ejemplo calculemos las velocidades de escape de algunos planetas. Por ejemplo:

para la Tierra,

$$v_{\text{tierra}} = (2 \cdot g \cdot R)^{1/2} = (2 \cdot 9,81 \text{ m s}^{-2} \cdot 6378 \cdot 10^3 \text{ m})^{1/2} = 11186 \text{ m/s} \approx 11,2 \text{ km/s.}$$

para el menor planeta, Mercurio,

$$v_{\text{mercurio}} = (2 \cdot 3,78 \text{ m s}^{-2} \cdot 2439 \cdot 10^3 \text{ m})^{1/2} = 4294 \text{ m/s} \approx 4,3 \text{ km/s.}$$

y para el mayor planeta, Júpiter,

$$v_{\text{jupiter}} = (2 \cdot 23,1 \text{ m s}^{-2} \cdot 71492 \cdot 10^3 \text{ m})^{1/2} = 57471 \text{ m/s} \approx 57,5 \text{ km/s.}$$

Resulta evidente que en Mercurio es más fácil lanzar un cohete, que desde la Tierra, pero donde es más difícil es en Júpiter donde la velocidad de escape es de unos 60 km/s.

(Para poder comparar los resultados añadiremos que los valores aceptados para cada cuerpo el Sistema Solar son los siguientes, Mercurio 4,3 km/s, Venus 10,3 km/s, Tierra 11,2 km/s, Marte 5,0 km/s, Júpiter 59,5 km/s, Saturno 35,6 km/s, Urano 21,2 km/s y Neptuno 23,6 km/s, como se ve nuestros sencillos cálculos dan unos resultados aceptables.)

Modelo de cohete con una pastilla efervescente

A modo de ejemplo de cohete para poder lanzar en el aula sin ningún peligro proponemos el que sigue que usa como propulsor los gases de una aspirina o pastilla efervescente. Basta recortar el modelo por las líneas continuas y pegar en las líneas de puntos de acuerdo con la fotografía.

Utilizamos una cápsula de plástico con una tapa de presión. Una cápsula utilizada para almacenar píldoras o alimentos para peces. Es necesario comprobar que la longitud de la circunferencia del cilindro central del cohete puede contener la capsula de plástico sin problemas. También pegamos los tres triángulos como soportes del cuerpo del cohete y añadimos finalmente el cono en la parte superior del cilindro (figuras 16a, 16b, 16c, 16d, 17, 18, 19a, 19b y 19c).

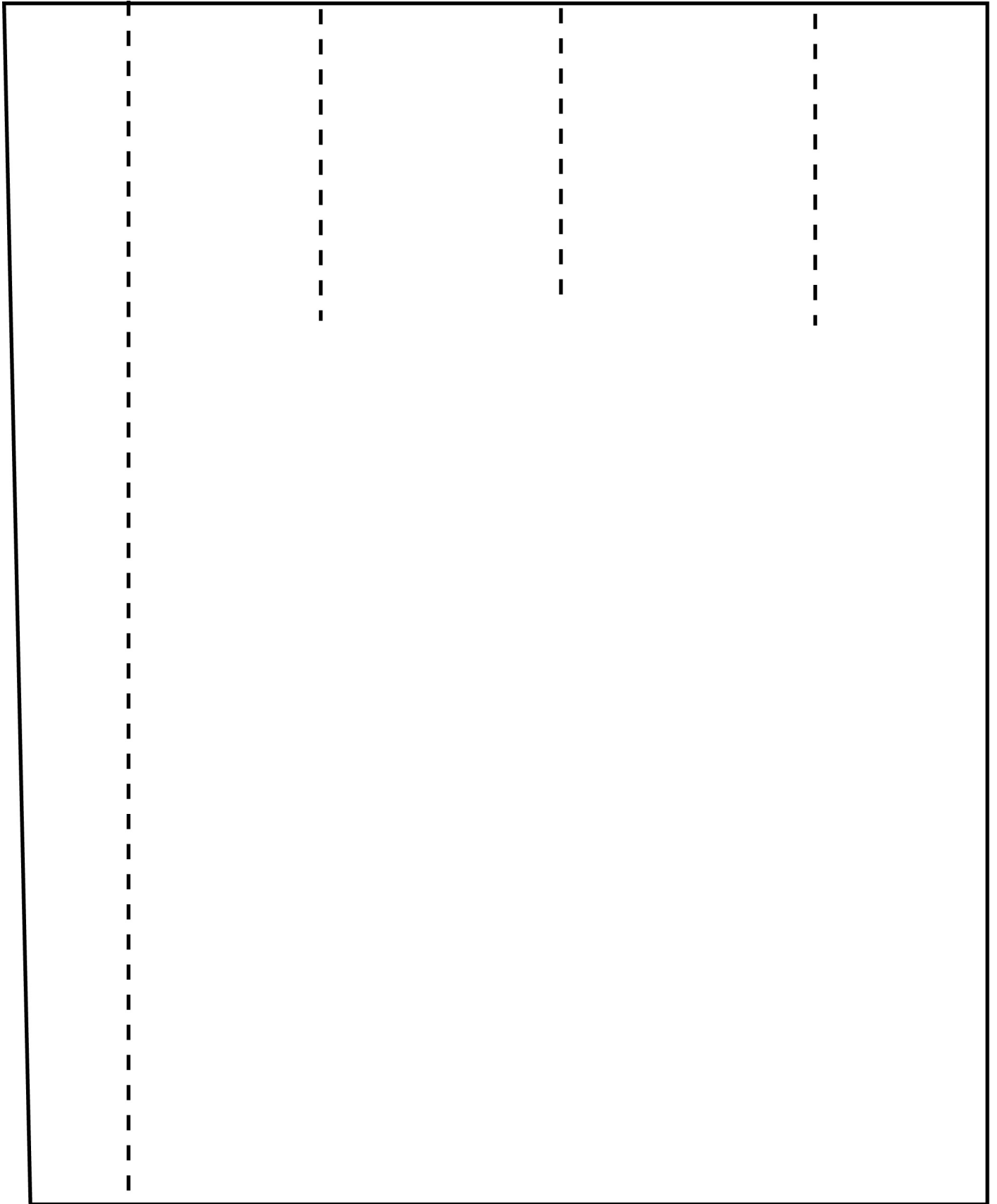


Fig. 19a: Cuerpo del cohete. Hay que pegar las aletas en la zona punteada.

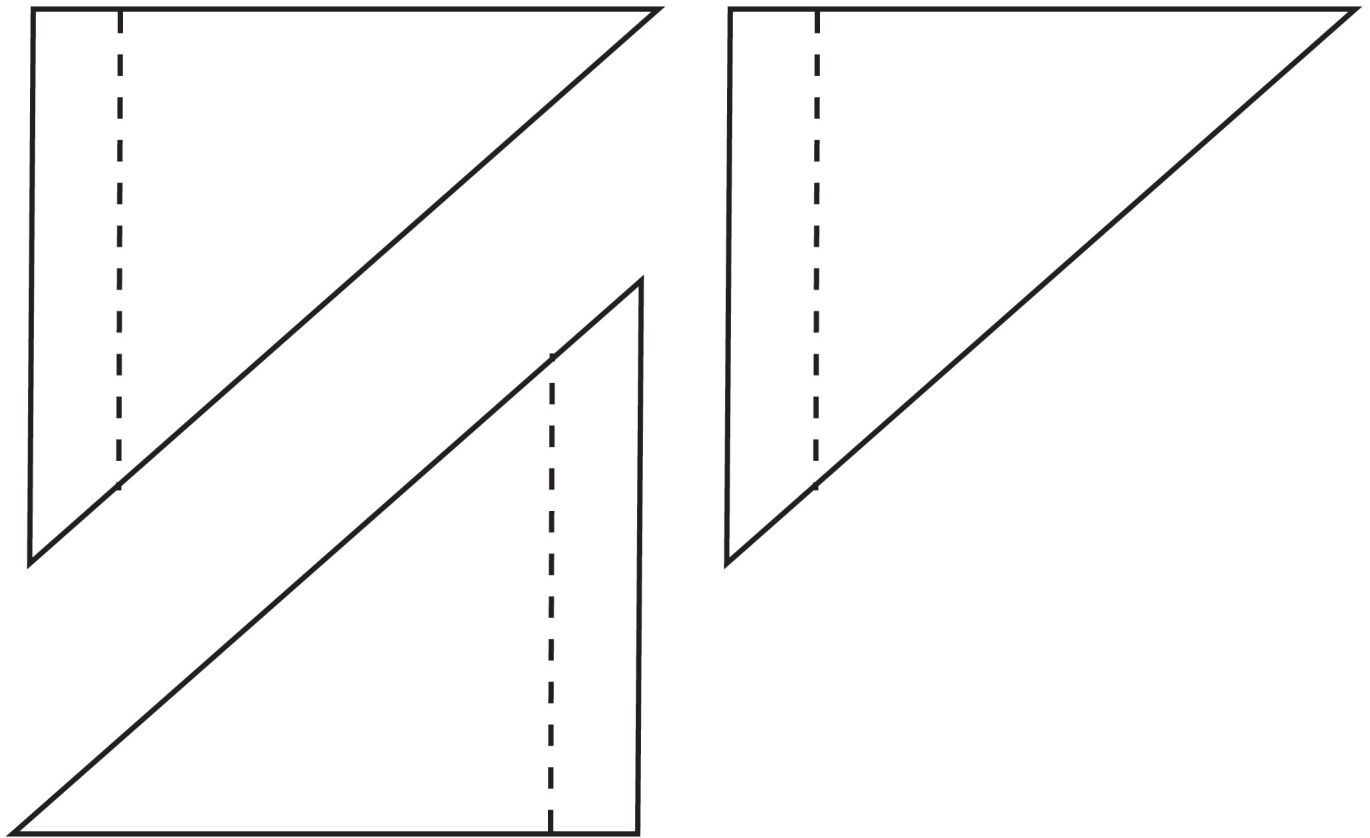


Fig. 19b: Modelo para las tres aletas

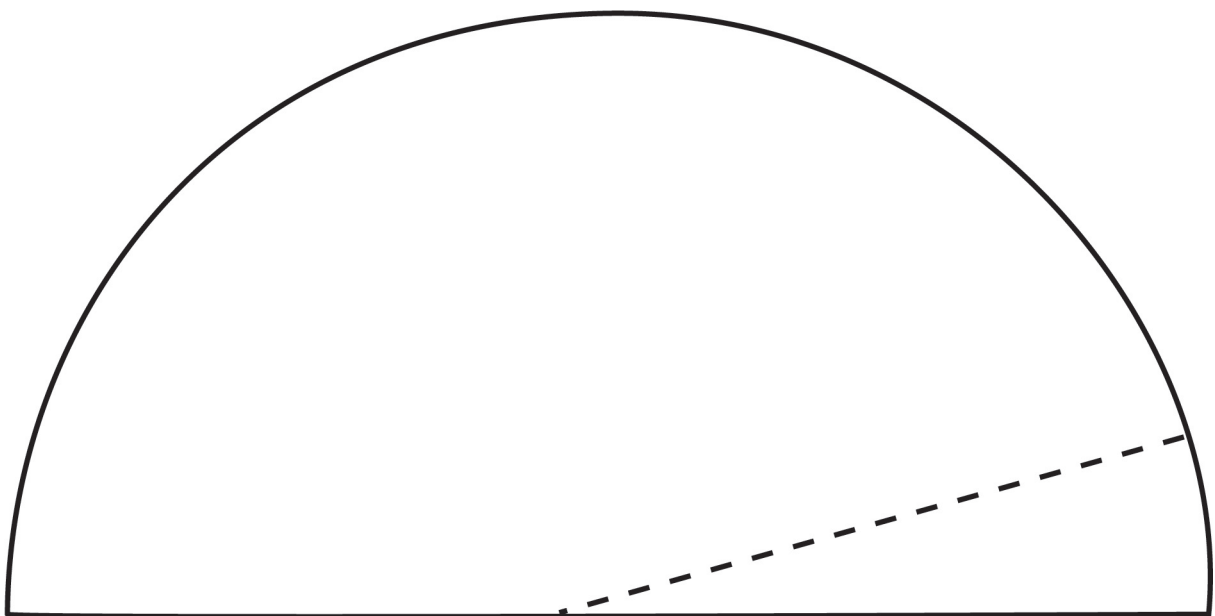


Fig.19c: Parte conoidal en la zona superior del cohete.



Fig. 16a, 16b, 16c y 16d: El proceso en cuatro instantáneas.

Cuando se haya terminado el cuerpo del cohete hay que realizar el lanzamiento. Para ello pondremos agua dentro de la cápsula de películas. 1/3 de su altura es suficiente (aproximadamente 1cm). Añadimos 1/4 de la aspirina efervescente (u otra pastilla efervescente). Ponemos la tapa y el cohete encima. Después de aproximadamente 1 minuto el cohete despegue. Evidentemente podemos repetir tantas veces como se desee el proceso (todavía restan 3/4 de aspirina, así que a disfrutar lanzando cohetes...).

También es posible lanzar cohetes usando bicarbonato y vinagre.



Fig. 17: Varios cohetes.

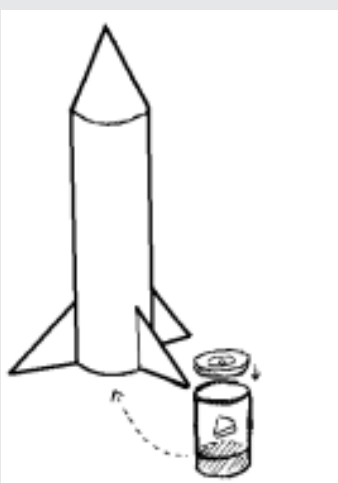


Fig. 18: Esquema simplificado.

Modelo de sistemas exoplanetarios

Como hemos visto antes, la distancia a Alfa Centauri, la estrella más cercana a nosotros, es enorme en comparación con la distancia de los plane-

tas de nuestro sistema solar. De hecho, Alpha Centauri es de unos 10 000 veces más lejos que Neptuno, nuestro planeta más distante. Estas enormes distancias hacen la detección de planetas alrededor de otras estrellas imposibles hasta que fueron desarrolladas sofisticadas técnicas de observación, cerca del final del siglo pasado.

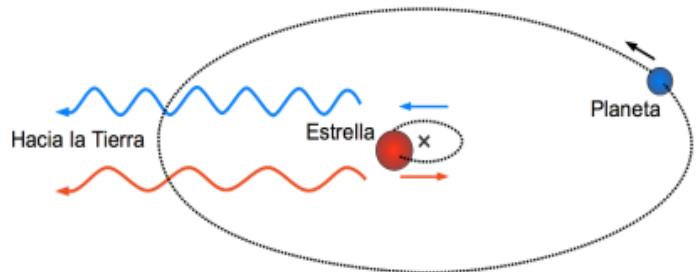


Fig. 20a: Método de la velocidad radial (RV) para la detección de planetas.

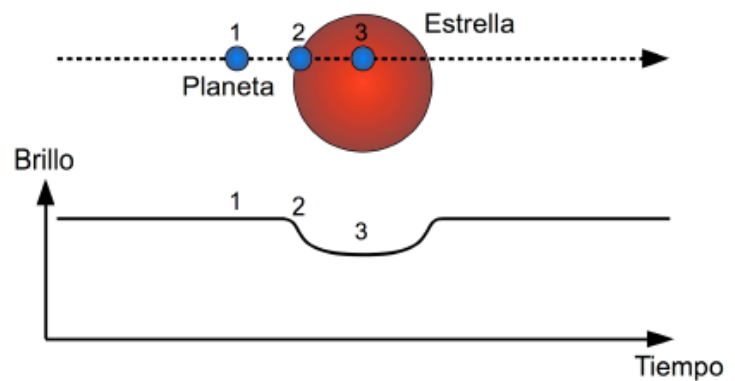


Fig. 20b: Método de tránsito para la detección de planetas.

Introducción a Exoplanetas

En la actualidad, existen dos métodos que están dominando en el descubrimiento de exoplanetas. Ambos son métodos indirectos, en los que la presencia de un sistema planetario se infiere de la observación de la estrella central del sistema.

El método de velocidad radial (RV) fue el primero con el que se encontró un exoplaneta alrededor de una estrella normal, con el descubrimiento de 51 Pegasus B en 1995. En este método, es medido el bamboleo de la estrella central debido a su movimiento alrededor del baricentro del sistema estrella-planeta. Este movimiento de la estrella central induce cambios muy pequeños en la luz de la estrella hacia el rojo o el azul (Fig. 20a), debido al desplazamiento Doppler. Con este método, podemos determinar la masa de un planeta respecto a la masa de la estrella central.

En la práctica, sin embargo, no sabemos la orientación de la mayoría de los sistemas de planetas detectados con el método de RV, y las masas de los planetas que podemos extraer son masas mínimas (lo que significa que las masas reales podrían ser más grandes). El otro método importante, llamado "método de tránsito" se basa en la observación de cambios en el brillo de una estrella cuando uno de sus planetas pasa ('tránsitos') delante de la estrella, ocultando de ese modo una pequeña parte de su disco estelar (Fig. 20b). Con el método de tránsito, R_p tamaño de un planeta se puede medir, en relación con el tamaño de R^* su estrella central, y se da aproximadamente por:

$$R_p/R^* = \sqrt{dF/F}$$

donde dF/F es el cambio relativo en el brillo observado durante el tránsito de un planeta (por ejemplo, $dF/F = 0,01$ de una estrella llega al 1% leve durante el tránsito).

NASA (<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>) mantiene en la actualidad un catalogo de objetos planetarios descubiertos fuera de nuestro Sistema Solar. En 2016, hubo más de 3000 planetas confirmados. Son llamados exoplanetas (abreviatura de planetas extrasolares). La nomenclatura de los exoplanetas es simple. La nomenclatura de los exoplanetas es simple. Una letra minúscula se coloca después del nombre de la estrella a partir de la letra "b" para el primer planeta hallado en el sistema (por ejemplo: 51 Pegasi b). El siguiente planeta detectado en el sistema es etiquetado con la siguiente letra del alfabeto c, d, e, f, etc.

(por ejemplo: 51 Pegasi c, 51 Pegasi d, 51 Pegasi e ó 51 Pegasi f).

Los planetas más conocidas tienen masas comparables a Júpiter, que es el planeta más grande de nuestro sistema solar. Es por esto que a menudo se indican las masas y tamaños de los planetas extrasolares en unidades de masas de Júpiter M_{Jup} ($1,90 \times 10^{27}$ kg) y radios de Júpiter- R_{Jup} (71492 km). Sólo muy pocos planetas (alrededor de 20) se sabe que tienen masas comparables a la Tierra. Sin embargo, hay más planetas (alrededor de 600, o el 20% de todos los conocidos) con tamaños comparables a la Tierra, de hasta 1,5 R_E (radios terrestres). Esperamos que estos planetas son los más comunes, pero las técnicas actuales de detección son más acertada en la detección de los objetos más masivos o más grandes.

En esta sección, consideramos algunos ejemplos de sistemas planetarios extrasolares que tienen más de tres planetas conocidos.

La tabla 9 muestra los planetas alrededor de la estrella Ups Andrómeda, Gliese 581 y del sistema Kepler-62. El sistema planetario de Ups Andrómeda y Gliese 581 fueron descubiertos con el método de velocidades radiales RV y de estos planetas que conocemos sus masas mínimas, pero no a sus tamaños. Para Gliese 581, el planeta "d" se ha perdido, así su descubrimiento se ha retirado, probablemente fue causado por una señal marginal en los datos.

Nombre del Planeta	Distancia media, ua	Periodo orbital, días	Masa mínima* Masas Júpiter o Terrestes	Descubierto año
Ups And b	0,059	4,617	0,69	1996
Ups And c	0,83	241,52	1,98	1999
Ups And d	2,51	1274,6	3,95	1999
Gl 581 e	0,03	3,149	0,006	2009
Gl 581 b	0,04	5,368	0,049	2005
Gl 581 c	0,07	12,929	0,016	2007
Kepler-62 b	0,0553	5,714932	<0,03	2013
Kepler-62 c	0,0929	12,4417	<0,013	2013
Kepler-62 d	0,12	18,16406	<0,044	2013
Kepler-62 e	0,427	122,3874	<0,113	2013
Kepler-62 f	0,718	267,291	<0,11	2013

Tabla 8: Tres sistemas extrasolares representativos con múltiples planetas. Datos extraídos del Extrasolar Planets Catalog2 (excepto la última columna). * Estos planetas que no se han descubierto por tránsito, se ha calculado su radio suponiendo que la densidad del planeta es igual a la densidad de Júpiter (1330 kg / m^3) para los planetas gaseosos. Para planetas considerados como terrestre, el diámetro se calculó usando la densidad de la Tierra (5520 kg / m^3).

Nombre del Planeta	Distanc. media, au	Periodo orbital, años	Masa, Masas de Jupiter	Diámetro, km
Mercurio	0,3871	0,2409	0,0002	4879
Venus	0,7233	0,6152	0,0026	12 104
la Tierra	1,0000	1,0000	0,0032	12 756
Marte	1,5237	1,8809	0,0003	6794
Júpiter	5,2026	11,8631	1	142 984
Saturno	9,5549	29,4714	0,2994	120 536
Urano	19,2185	84,04	0,0456	51 118
Neptuno	30,1104	164,80	0,0541	49 528

Tabla 9: Planetas del Sistema Solar.

Los planetas del sistema Kepler-62 fueron descubiertos a partir de los tránsitos. Por lo tanto, se sabe que sus tamaños. De sus masas sólo conocemos límites superiores (masas máximo), y son demasiado pequeños (y de peso ligero) para ser detectable con el método de velocidades radiales. Sin embargo, hay también muchos planetas que se han detectado tanto con el tránsito y el método de velocidades radiales, y conocemos tanto sus masas y como sus tamaños.

Algunos exoplanetas que están muy cerca de la estrella central (Gliese 876 con una órbita más cercana a la estrella que Mercurio esta del Sol). Otros tienen planetas más lejanos (HD 8799 tiene un sistema planetario con tres planetas más o menos tan lejos como Neptuno esta del Sol). Una de las posibilidades para visualizar estos datos consiste en construir modelos a escala del sistema planetario elegido. Esto nos permitirá comparar fácilmente unos con otros y con nuestro Sistema Solar.

Actualmente sabemos que hay exoplanetas en diferentes tipos de estrellas. En 1992 los radio-astrónomos anunciaron el descubrimiento de planetas alrededor del púlsar PSR 1257 +12. En 1995 se anunció la primera detección de exoplanetas alrededor de una estrella "normal" de tipo solar, 51 Pegasi y después han sido detectados exoplanetas en órbita en torno a: una estrella enana roja (Gliese 876 en 1998), una estrella gigante ((Iota Draconis en 2001), una enana marrón estrella (2M1207 en 2004), una estrella de tipo A (Fomalhaut en 2008), un planeta se desintegra en torno a una estrella enana blanca (WD1145-1017), entre otros.

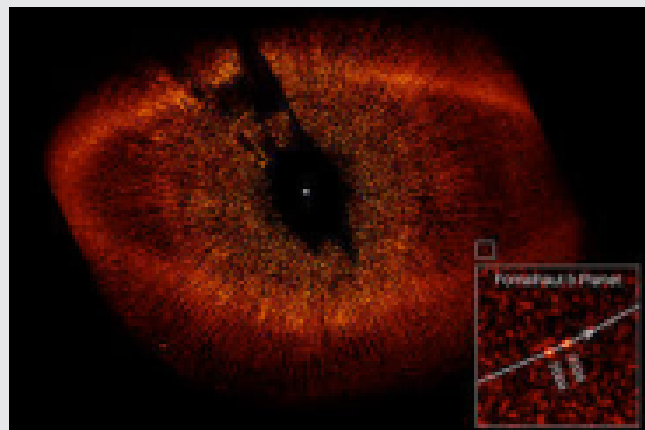


Fig. 21: Planeta Fomalhaut b dentro de la nube de polvo interplanetario de Fomalhaut en una imagen del Hubble Space Telescope (Foto: NASA).

Determinación del diámetro de exoplanetas

Por planetas como los de Ups And, hallados por el método de velocidades radiales, no sabemos su tamaño. Aquí vamos a estimar el diámetro de un par de exoplanetas incluidos en la tabla 9.

Podemos lograr este objetivo, asumiendo que sabemos que la densidad del exoplaneta. Para nuestro estudio, consideramos que los planetas gaseosos tienen la densidad de Júpiter y que los exoplanetas terrestres tienen la misma densidad que el planeta Tierra. Por definición, la densidad de un cuerpo de masa m está dado por:

$$\rho = m/V$$

La masa m del exoplaneta aparece en la tabla 9, y el volumen V se puede obtener considerando el planeta como una esfera

$$V = \frac{4 \cdot \pi \cdot R^3}{3}$$

Si sustituimos esta fórmula en la anterior, se puede obtener el radio del exoplaneta,

$$R = \sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\rho}}$$

Sugerimos al lector calcular el diámetro de Gliese 581c (exoplaneta terrestre) suponiendo que su densidad es $\rho = 5520 \text{ kg/m}^3$ (la densidad de la Tierra). A continuación, repetir el cálculo para un exoplaneta no terrestre, tales como el primer sistema planetario múltiple que fue descubierto alrededor de una estrella de la secuencia principal, Upsilon Andromedae. Este sistema consta de tres planetas, todos ellos similares a Júpiter: planetas b, c y d de Upsilon Andromeda. Hay que calcular sus diámetros asumiendo $\rho = 1330 \text{ kg/m}^3$ (la densidad de Júpiter) y comparar los resultados con los de la tabla 8.

Usando estos resultados y la distancia media que aparece en la tabla 8, se puede producir un modelo en la siguiente sección.

Determinación de la masa de la estrella central

Haciendo uso de los valores de la tabla 9 y la tercera de las leyes de Kepler, se puede estimar la masa de la estrella central M . Es bien sabido que $a^3/P^2 = \text{const}$ y podemos demostrar que esta constante es la masa de la estrella central, expresada en masas solares. Asumiendo que el movimiento de los exoplanetas alrededor de la estrella en una órbita circular de radio a , se puede escribir:

$$m \cdot \frac{v^2}{a} = \frac{G \cdot M \cdot m}{a^2}$$

Para este movimiento circular, la velocidad v verifica,

$$v^2 = \frac{G \cdot M}{a}$$

El periodo P , para un movimiento circular, es

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{v}$$

donde al introducir el valor de la velocidad v anterior, se deduce:

$$P^2 = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot a^3}{G \cdot M}$$

Y, para cada exoplaneta, usando la tercera ley de Kepler se despeja,

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G \cdot M}{4 \cdot \pi^2}$$

Escribiendo la relación anterior para la Tierra que gira entorno al Sol, usando $P=1$ año y $a=1$ ua, deducimos la siguiente relación

$$1 = \frac{G \cdot M_s}{4 \pi^2}$$

Si dividimos las dos últimas igualdades, y usando la masa del Sol como unidad, obtenemos

$$\frac{a^3}{P^2} = M$$

donde sabemos que a es el radio de la órbita (en ua), P el período de revolución (en años) y podemos determinar la masa de la estrella central dada en masas solares. Esta relación nos permite determinar la masa de la estrella central en unidades de masas solares. Por ejemplo, calcular la masa de la estrella de Upsilon And y Gl 581 en masas solares (el resultado debe ser 1,03 y 0,03 masas solares).

Modelo a escala de un sistema exoplanetario

Primero elegimos la escala del modelo. Para distancias, la escala apropiada es: 1 UA = 1 m. En este caso todos los exoplanetas pueden caber dentro de un aula típica, así como los primeros cinco planetas de nuestro sistema solar. Si la actividad se lleva a cabo fuera (por ejemplo, en el patio de la escuela), podemos construir un modelo completo. A escala diferente necesita ser utilizado para el tamaño del planeta, por ejemplo: 10000 kilómetros = 0,5 cm. En este caso, el planeta más grande, Júpiter, es de 7 cm de diámetro y el más pequeño (Mercurio) será de 0,2 cm de tamaño. Ahora podemos construir el Sistema Solar, o cualquiera de los sistemas de la tabla 8 utilizando los valores medios a distancia incluidos en las tablas 8 y 9, y los diámetros calculados previamente. Para las estrellas centrales, podemos calcular sus tamaños de la relación radio-masa estelar, con R y M en unidades solares,

$$R \sim 1.06 M^{0.945}$$

y usando la masa deducida del ejercicio anterior.

En los últimos años hemos aprendido que las configuraciones de los sistemas planetarios son diversas. La parte interna del Sistema Solar está poblada por los pequeños planetas rocosos, y el primero de los planetas gigantes gaseosos, Júpiter, está a 5,2 UA del Sol. Muchos de los exoplanetas, sin embargo, orbitan alrededor de sus estrellas mucho más cerca que cualquier planeta en nuestro propio Sistema Solar orbita alrededor del Sol. Otra diferencia es que muchos de estos que orbitan cercanos son grandes planetas gaseosos.

Estas diferencias se cree que son principalmente debidas a un sesgo observacional. El método de la velocidad radial es más sensible cuando los planetas están en órbitas más pequeñas y son más masivos. Además, con el método de tránsito es más probable detectar planetas en órbitas cortas que están cerca de su estrella central. Sin embargo, se puede suponer que la mayoría de los exoplanetas tienen órbitas mucho más grandes. Parece plausible que en la mayoría de los sistemas exoplanetarios, hay uno o dos planetas gigantes con órbitas similares en tamaño a las de Júpiter y Saturno. También se espera que una gran fracción de las estrellas tengan planetas similares a la Tierra en órbitas similares a nuestra Tierra. Sin embargo, su detección es muy difícil y, en consecuencia, sólo se conocen muy pocos de ellos.

Habitabilidad de los exoplanetas

Ahora consideramos la habitabilidad de los exoplanetas. La zona habitable es la región alrededor de una estrella donde un planeta con suficiente presión atmosférica puede mantener agua líquida en su superficie. Esta es una definición conservadora y se limita a la vida tal como la conocemos en la Tierra. Algunos científicos planetarios han sugerido incluir zonas equivalentes alrededor de las estrellas en las que podrían existir otros compuestos disolventes tales como amoníaco y metano en formas líquidas estables.

Los cálculos aproximados indican que la zona del sistema solar habitable, donde puede existir agua líquida (es decir, donde la temperatura varía de 0° a 100° C), oscila entre 0,7 a 2 ~ UA. El borde interior de esta zona se encuentra cerca de las órbitas de Venus y el borde exterior está cerca de la órbita de Marte (el área verde en la figura 22).

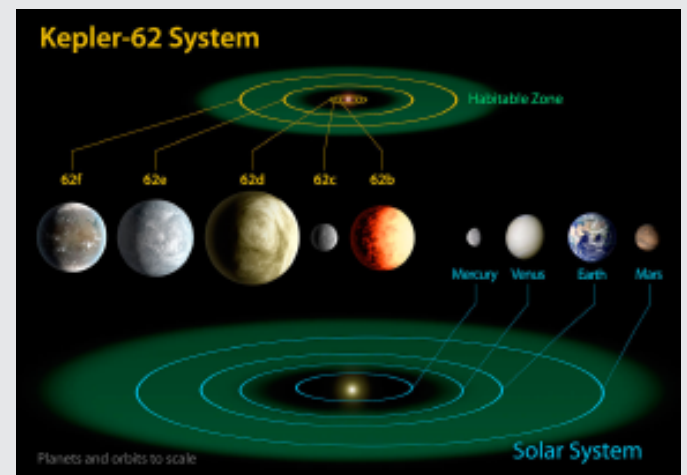


Fig. 22: El sistema Kepler-62 en comparación con el sistema solar interior. La región verde indica la zona habitable - la zona donde la vida tal como la conocemos podría existir. Fuente NASA Ames / JPL-Caltech.

Existen muchas estimaciones diferentes de la zona habitable del sistema solar (ver Wikipediasobre Zona Habitable) sin embargo, una reciente de Kopparapu en 2013 coloca el borde interior a una distancia de 0,99 UA, justo dentro de la órbita de la Tierra. Como sabemos, sólo la Tierra está habitada, ya que Venus es demasiado caliente, con un fuerte efecto invernadero en el planeta, mientras que Marte no tiene agua de la superficie y en el mejor, podría tener algo de vida microbiana muy básico. Conocida la energía de salida de una estrella, las estimaciones de la zona habitable de nuestro sistema solar fácilmente se pueden ampliar a otros sistemas planetarios. Una lista de planetas potencialmente habitables se da en <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>.

También dan una tabla donde estos planetas están ordenados por un "índice de similitud de la Tierra = ESI "

Posiblemente el ejemplo más interesante de un sistema planeta potencialmente habitable es Kepler-62, cuyos tránsitos fueron descubiertos por la misión espacial Kepler en 2013. Este sistema contiene al menos 5 planetas, todos ellos con radios de entre 0,54 y 1,95 radios terrestres.

De particular interés son los planetas e y f, ya que son los mejores candidatos para planetas sólidos que caen en la zona habitable de su estrella. Sus radios, 1,61 y 1,41 radios terrestres,

respectivamente, los sitúan en el intervalo de radios de los que pueden ser planetas terrestres sólidos. Sus posiciones en el sistema de Kepler-62, por otro lado, significa que caen dentro de la zona habitable de Kepler-62: el rango de distancia en la que al menos para algunas condiciones atmosféricas, estos dos planetas podría tener agua líquida en sus superficies, tal vez que los cubre ellos por completo. Para Kepler-62e, que se encuentra cerca de la gama interior de la zona habitable, esto requeriría una cobertura de nubes reflectante que reduce la radiación que calienta la superficie.

Kepler-62f, por el contrario, se encuentra en la zona externa de la zona habitable, al igual que Marte en nuestro sistema solar. Allí, cantidades significativas de dióxido de carbono se requieren para mantener caliente la superficie de un planeta de agua suficiente para que la superficie del líquido. Si se consideran los tamaños de Marte y Kepler-62f: ¿Qué planeta tiene más probabilidades de albergar vida, y por qué?

Todavía hay muchas preguntas sin respuesta acerca de las propiedades de los exoplanetas. Saber más de ellos y aprender más sobre sus propiedades y características ha motivado para varias misiones espaciales actuales y también futuras, como las misiones KEPLER y TESS de la NASA y los CHEOPS europeas y las misiones de Platón, esta última con el lanzamiento en el año 2024 .

.....

Bibliografía

- Berthomieu, F., Ros, R.M., Viñuales, E., "Satellites of Jupiter observed by Galileo and Roemer in the 17th century", Proceedings of 10th EAAE International Summer School, Barcelona, 2006.
- Gaitsch, R., "Searching for Extrasolar Planets", Proceedings of 10th EAAE International Summer School, Barcelona 2006.
- Ros, R.M., "A simple rocket model", Proceedings of 8th EAAE International Summer School, 249, 250, Barcelona, 2004.
- Ros, R.M., "Measuring the Moon's Mountains", Proceedings of 7th EAAE International Summer School, 137, 156, Barcelona, 2003.
- Vilks I., "Models of extra-solar planetary systems", Proceedings of 10th EAAE International Summer School, Barcelona 2006.

Preparación de observaciones

Francis Berthomieu, Ricardo Moreno, Beatriz García, Rosa M. Ros

International Astronomical Union, CLEA (Niza, Francia), Colegio Retamar (Madrid, España), Universidad Tecnológica Nacional (Mendoza, Argentina), Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España)

Resumen

Una salida para observar el cielo es siempre una ocasión de aprender y de pasarlo bien, sobre todo si se hace con un grupo de amigos aficionados. Hay que preparar esta salida con tiempo, especialmente si se va a llevar instrumental. Sin embargo, no hay que despreciar las salidas más sencillas para ver a simple vista el cielo, con unos binoculares o prismáticos.

Objetivos

- Explicar cómo elegir una fecha y lugar adecuado para realizar observaciones astronómicas, qué material hay que llevar y cómo planificar la salida.
- Aprender a utilizar el programa Stellarium.
- Reconocer el problema de la contaminación lumínica.

Elección del lugar y la fecha

La iluminación ambiental influye mucho en nuestra percepción del cielo estrellado. En las ciudades sólo se pueden observar el Sol, la Luna, los planetas que son visibles a simple vista, y unas pocas estrellas y satélites artificiales. Sin embargo, para un primer contacto con la Astronomía puede concretarse la observación en un ambiente no demasiado oscuro, con la ventaja de poder hacerlo en la escuela o en casa, sin desplazamientos.

Si se quieren observar más estrellas y nebulosas, es necesario irse a un sitio alejado de carreteras y pueblos, ya que, debido a la iluminación pública, envían al cielo un "globo" de luz que impide la correcta visión del cielo estrellado. Este fenómeno se conoce como "contaminación lumínica". También hay que evitar la cercanía de farolas o luces aisladas. No debe haber cerca árboles grandes, ni carreteras por donde circulen coches que nos deslumbren con sus faros.

En cuanto a la fecha, es preferible que haga buen tiempo, con buena temperatura y pocas posibilidades de nubes (se recomienda consultar el pronóstico del clima en internet). La fase de la Luna es muy importante. Los peores días son cuando la Luna está llena, pues producirá mucha luz ambiental y veremos sólo las estrellas más brillantes. Cuando está en fase decreciente, saldrá tarde, no la veremos a menos que nos quedemos observando hasta la madrugada, pero la oscuridad del cielo estará asegurada. Quizá los días más interesantes son cuando está algo menos de cuarto creciente, ya que las primeras horas de la noche podemos dedicarlas a ver los cráteres de nuestro satélite, y en cuanto se ponga debajo del horizonte, a las pocas horas, dejará un cielo totalmente oscuro y aun será temprano para seguir observando.

Si llevamos telescopio, conviene ir al lugar elegido con tiempo suficiente para llegar con luz natural y tener tiempo para realizar el montaje del material antes de que anochezca.

Material necesario

Plano del cielo o planisferio, aproximadamente de la fecha y hora de la observación y para el lugar desde el cual observaremos. Debemos recordar que el cielo cambia según la latitud del observador. Estos planos, mapas o cartas celestes se pueden obtener del programa Stellarium (www.stellarium.org, en el anexo se ofrece una guía rápida), en revistas de astronomía o en anuarios. En la web hay muchos sitios donde obtenerlas, por ejemplo en www.heavens-above.com/skychart.asp o en www.skyandtelescope.com. Para obtener cualquiera de estos mapas celestes hay que indicar la situación geográfica, el día y la hora de la observación.

Linterna de luz roja. Si bien nuestras pupilas, en la oscuridad, se abren lentamente para dejar pa-

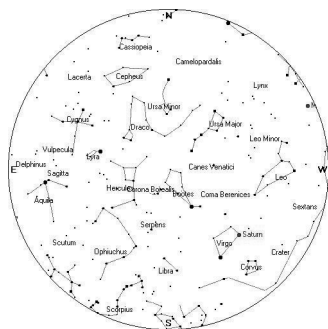


Fig. 1: Ejemplo de mapa del cielo para una latitud media norte, a mediados de julio a las 22 h.

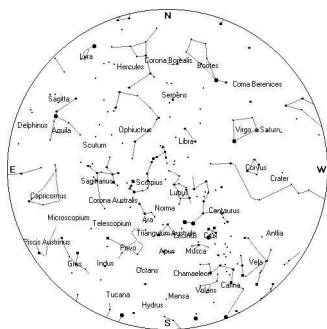


Fig. 2: Ejemplo de mapa del cielo para una latitud media sur, a mediados de julio a las 22 h.

ra dejar pasar más luz, lo que asegura poder “ver” de noche, es la capacidad de nuestro ojo denominada “visión nocturna” la que nos permite hacer observaciones astronómicas. La visión nocturna está relacionada con uno de los dos tipos de células fotosensibles en la retina: los bastoncitos. En la retina existen dos tipos de células, los conos, sensibles al color y que se activan cuando hay mucha luz, y los bastoncitos, que sólo están activos con bajos niveles de iluminación. Si la zona donde estamos mirando se ilumina de repente, la pupila se cierra en seguida y los bastoncitos se desactivan. Aunque vuelva la oscuridad, la pupila tardará un breve lapso en abrirse totalmente de nuevo, pero los bastoncitos tardarán unos 10 minutos en permitirnos recuperar la visión nocturna. Eso no ocurre con la luz roja, con la que podemos iluminar sin problemas el plano del cielo, el suelo, etc. Basta una linterna normal con un filtro sencillo de papel rojo transparente.

Comida. Hay que tener en cuenta que el tiempo total de la actividad será de varias horas, contando viaje, preparación del material, observación, recogida y viaje de regreso. La actividad será más agradable si compartimos algo de comer y de beber (frío o caliente en función del clima).

Puntero láser verde, es útil para señalar constelaciones, estrellas, etc. Hay que ser muy cuidadoso con este tipo de punteros. Nunca debe apuntarse a los ojos de los participantes de la observación ni a los de nadie, pues puede dañarlos. Esta herramienta sólo debe ser manipulada por adultos.

Ropa de abrigo. Aunque sea en verano, al anochecer siempre baja la temperatura, con frecuencia se levanta viento, y hay que tener en cuenta que vamos a estar parados unas cuantas horas seguidas. No debe tomarse como referencia la temperatura durante el día.

Prismáticos, telescopios, cámara de fotos según la observación que vayamos a hacer.

Alternativa por si hay nubes. Un cielo nublado nos puede trastocar todo el plan. Sin embargo podemos tener previsto algún plan alternativo: contar historias sobre los personajes de las constelaciones o hablar sobre algún tema de astronomía. Si disponemos de Internet, podemos disfrutar del popular Google-Earth, pero aplicado a la esfera celeste (Google Sky) o Marte o la Luna, o de cualquier otro programa de simulación del cielo. Si disponemos de una casa cercana, podemos ver algún video sobre algún tema astronómico.

Observación a simple vista

Es fundamental conocer el cielo a simple vista. Eso significa conocer los nombres de las principales constelaciones y de las estrellas más brillantes, para lo que sólo se necesita un plano del cielo, y de ser posible, un puntero láser verde. También son muy útiles aplicaciones para el iPhone o Android que te muestra en la pantalla las constelaciones y planetas al apuntarlo hacia cualquier parte del cielo, usando el GPS del teléfono. Como no le afectan las nubes, puede servir de alternativa si el cielo se cubre.

Las estrellas que se pueden ver dependen del lugar donde estemos: cerca del Polo Norte sólo veríamos el 50% de las estrellas de todo el cielo, las que están en el hemisferio norte celeste. En las proximidades del ecuador podremos ver toda la esfera celeste, sólo dependerá de la época del año. Cerca del Polo Sur volvemos a ver sólo la mitad, en este caso las que hay en el hemisferio sur celeste.

Las constelaciones y estrellas que habría que conocer son:

HEMISFERIO NORTE

Constelaciones: Osa Menor, Osa Mayor, Casiopea se ven siempre. En verano se ven también Cygnus, Lyra, Hércules, Bootes, Corona Boreal, Leo, Sagitario y Escorpio. Las que se ven en invierno son: Orión, Can Mayor, Taurus, Auriga, Andrómeda, Pegasus, Gemini, Pléyades...

Estrellas: Polar, Sirio, Aldebarán, Betelgeuse, Rigel, Arturo, Antares, etc.

HEMISFERIO SUR

Constelaciones: Cruz del Sur, Sagitario, Escorpio, Leo, Carina, Puppis y Vela (estas tres constelaciones formaban la antigua constelación de Argos, el navío de los Argonautas). También es posible ver Orión y el Can Mayor desde este hemisferio.

Estrellas: Antares, Aldebarán, Sirio, Betelgeuse. En el hemisferio sur no existe una estrella que marque la ubicación del Polo Sur celeste.

Las constelaciones que se encuentran en la región denominada “del zodiaco”, se ven desde el hemisferio norte y desde el sur, aunque cambia su orientación en la esfera celeste.

Es interesante ir siguiendo el cambio de las fases de la Luna día a día, y el cambio de su posición respecto de las estrellas. Esto último se puede hacer también con los planetas, notando su lento movimiento respecto de otros planetas cercanos o respecto de las estrellas. Esto es especialmente notable en los que se mueven más deprisa como Venus o Mercurio, cuando se ven al atardecer. Estos planetas también pueden ser visibles al amanecer y entonces uno puede seguir reconociéndolos en el cielo más allá de la noche de observación.

Durante un par de horas después del atardecer, se pueden observar estrellas fugaces (meteoros) en cualquier fecha, con una frecuencia aproximada de entre 5 y 10 por hora. En determinados momentos del año hay “lluvia de estrellas”, en la que se ven muchas más. Por ejemplo alrededor del 3 de enero están las Cuadrántidas, con unas 120 por hora, sobre el 12 de agosto las Perseidas, con 100/h, el 18 de noviembre es el máximo de las Leónidas, con unas 20/h, y entre el 12 y el 14 de diciembre se ven las Gemínidas, con 120/h. Las Perseidas no son visibles desde el hemisferio sur.

Hay muchos satélites que orbitan la Tierra y que al ser iluminados por el Sol se pueden ver desde la Tierra, cruzando lentamente el cielo. Como la altitud no suele ser mucha, sólo se ven si no hace mucho que se ha ocultado el Sol. Por ejemplo, la ISS es bastante brillante y tarda unos 2-3 minutos en recorrer la parte visible del cielo. De estos satélites

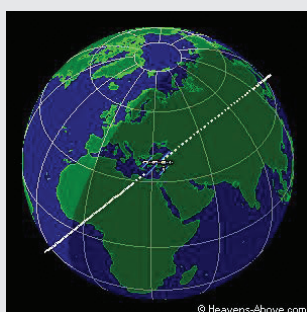


Fig. 3: Paso de la ISS.



Fig. 4: Ampliación y diámetro del objetivo.

y de otros muchos se puede predecir el paso sobre un determinado lugar geográfico con una semana de antelación (ver www.heavens-above.com).

Observación con prismáticos

Un instrumento astronómico muy útil y al alcance de cualquiera son los prismáticos. Aunque su capacidad de aumento suele ser pequeña, recogen mucha más luz que nuestra pupila, por lo que sirven para ver objetos que a simple vista son muy poco luminosos, como cúmulos de estrellas, nebulosas y estrellas dobles. Además tienen la ventaja de que aumentan las diferencias de colores de las estrellas, especialmente si se desenfocan ligeramente.

Suelen llevar inscripciones como 8x30 ó 10x50. La primera cifra da la ampliación (o aumento) y la segunda la apertura de la lente delantera, el objetivo, en mm. Uno muy recomendado para esta actividad es el 7x50. Con mayores aumentos la imagen se mueve mucho, ya que es difícil mantener el pulso, y mayores aperturas aumentan bastante el precio.

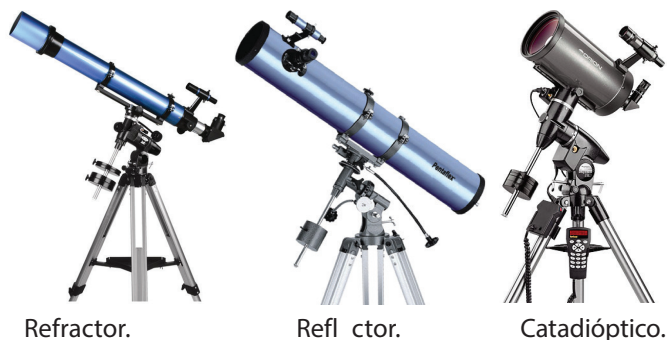
Objetos interesantes para ver con prismáticos son la galaxia de Andrómeda (M31), el cúmulo de Hércules (M13), el cúmulo doble de Perseo, el Pesebre (M44), la nebulosa de Orión (M42), toda la zona de Sagitario (nebulosa de la Laguna M8, Trífida M20, Omega M17, varios cúmulos globulares M22, M55, etc.) y en general la Vía Láctea, que se ve con muchas más estrellas que a simple vista. En el hemisferio sur, Omega Centauro y 47 Tucán resultan cúmulos globulares espectaculares.

Observación con telescopio

La mayoría de la gente sabe que la misión de un telescopio es ampliar los objetos lejanos, pero son menos los que saben que tiene además otra misión tan importante como esa: captar más luz que el ojo humano. Así se consiguen ver objetos débiles, que seguirían siéndolo aunque aumentáramos mucho la visión.

Un telescopio tiene dos partes esenciales: el objetivo y el ocular. El primero es una lente de gran diámetro y poca curvatura (telescopios refractores) o un espejo parabólico (telescopios reflectores). El segundo es una lente pequeña y de gran curvatura, junto a la cual, como su propio nombre indica, ponemos el ojo para mirar. Suele ser extraíble, y es el que nos dará más o menos aumentos.

Cuanto mayor sea el objetivo, más luz consigue concentrar, y podremos ver objetos más débiles. Lentes grandes de calidad son más caras que espejos de esos mismos diámetros, por lo que son más frecuentes los telescopios reflectores. El tipo más frecuente es el newtoniano, que consta de un espejo cóncavo en el fondo del tubo, que devuelve



Refractor.

Refl ctor.

Catadióptico.

Fig. 5: Diferentes tipos de ópticas

los rayos a la boca de éste, donde hay un pequeño espejo secundario formando un ángulo de 45° con el eje del telescopio, que desvía los rayos al exterior del tubo, donde está el ocular. El espejo secundario bloquea algo de la luz que entra, pero no es significativo. Otro diseño es el tipo Cassegrain, en el que el secundario envía la luz hacia un orificio central del espejo primario. Así suelen ser los profesionales. Por último están los catadiópticos, que suelen ser como estos últimos pero añadiéndoles una lente delgada en la entrada del tubo, con lo que reducen mucho la longitud del tubo y lo hacen más ligero y transportable.

La capacidad de ampliación (aumento) de un telescopio viene dada por el cociente entre la longitud focal del objetivo y la del ocular. Por ejemplo, si tenemos un telescopio con una longitud focal del objetivo de 1.000 mm y le ponemos un ocular de longitud focal de 10 mm, obtenemos una ampliación de 100 aumentos ($\times 100$). Si queremos duplicar los aumentos necesitaremos o un objetivo de mayor longitud focal o poner un ocular de menor. Esto tiene un límite en la práctica, ya que oculares con longitudes focales pequeñas son difíciles de fabricar y dan imágenes borrosas.

Los fabricantes a menudo describen los telescopios en términos de razón focal, como por ejemplo $f/6$ ó $f/8$. La razón focal es la longitud focal de la lente o espejo primario dividido por la apertura y sirve para conocer una de estas dos magnitudes, si se sabe la otra. Si por ejemplo, tenemos un telescopio refractor de $f/8$ y el objetivo es una lente de 60 mm de diámetro, la longitud focal real del telescopio será la razón focal multiplicada por la apertura, es decir, $8 \times 60 = 480$ mm. A igual apertura del objetivo, cuanto mayor relación focal, menor campo de visión y más aumentos.

Cuanto mayor sea la apertura de un telescopio más luz captará —será más luminoso— y se podrán ver objetos más débiles. También será mayor su

capacidad de resolución, que es la capacidad de ver detalles: cuando es baja se ve la imagen borrosa, y cuando es alta se ve muy nítida, con muchos detalles. También influye la oscuridad de la noche: en días de Luna llena o con luminosidad en los alrededores no se ven las estrellas débiles.

Otra limitación importante es la **estabilidad atmosférica**. Todos hemos visto cómo la atmósfera caliente de un desierto hace temblar la visión en escenas de películas tomadas con teleobjetivos. Cuando miramos a través de un telescopio, pequeñas perturbaciones del aire hacen que la imagen se mueva. Los astrónomos se refieren a esto con el concepto de seeing. La atmósfera es la que hace titilar (parpadear) a las estrellas.

La imagen que se ve con un telescopio está **invertida**, pero esto no importa mucho: en el Cosmos las posiciones arriba y abajo son muy relativas. Hay accesorios que invierten la imagen y la ponen correctamente, pero disminuyen un poco la luminosidad.

La montura es una pieza importante en un telescopio. Las de mala calidad hacen que el tubo del telescopio oscile cada vez que se le toque. El resultado es un baile en la imagen que, aparte de marear al más entusiasta, impide ver los detalles. Es importante que sean rígidas y estables.

Hay dos tipos de monturas: la azimutal y la ecuatorial. La primera es la más sencilla pero la menos útil. Puede girar a izquierda y derecha sobre su eje vertical, y arriba y abajo alrededor de un eje horizontal. La montura Dobson es un tipo de montura azimutal muy sencilla de transportar y usar. En las monturas ecuatoriales hay dos ejes inclinados y formando 90 grados. Uno, el polar, tiene que estar dirigido hacia el polo norte, si estamos en el hemisferio norte o hacia el polo sur, si estamos en el hemisferio sur. Este eje representa el eje de rotación de la Tierra y por lo tanto debe estar orientado paralelo al mismo y cortara el cielo en el polo celeste correspondiente al hemisferio del observador.



Monturaazimutal

Montura ecuatorial

Montura Dobson

Fig. 6: Diferentes soportes de telescopios.

Los giros a su alrededor dan las ascensiones rectas. El otro eje, el ecuatorial, nos da las declinaciones. Esta montura es la usada por los astrónomos profesionales y por la mayoría de los aficionados. Pueden llevar un motor en el eje ecuatorial que va compensando la rotación de la Tierra. Si no, especialmente con grandes ampliaciones, la imagen se va del campo de visión en un tiempo sorprendentemente corto.

Si se dispone de una montura ecuatorial, es conveniente “poner el telescopio en estación”, es decir, orientarlo de tal forma que el eje polar esté alineado con el Polo Norte (o Sur) del cielo. Eso lleva su tiempo, pero es necesario para que el motor de seguimiento ecuatorial sirva para que el objeto que miramos no se mueva al pasar el tiempo, cosa imprescindible en fotografía. Si no disponemos de motor, el ponerlo en estación es menos importante, pero nos servirá para mantener el objeto en el campo de vista moviendo una única rueda.

Por último, hay telescopios computarizados, con una base de datos de posiciones de objetos celestes y dos motores. La puesta en estación suele ser mucho más fácil, así como la búsqueda de objetos, pero el precio sube bastante.

Los movimientos de la bóveda celeste

Básicamente los movimientos que percibimos en la bóveda celeste responden a los movimientos relativos consecuencia de la rotación y la translación de la Tierra. Esta situación nos hace percibir la bóveda celeste como un conjunto con dos movimientos básicos: diario y anual.

El movimiento diario es muy importante, es decir muy rápido y casi no nos permite percibir el movimiento anual que es mucho más lento. La Tierra gira una vuelta de 360° en 24 horas, esto es 15° cada hora y se nota mucho aunque no estemos realizando observaciones cuidadosas. El movimiento de translación es de 360° cada 365 días, es decir aproximadamente un grado cada día (algo menos de un grado por día). Si imaginamos que no existiera el movimiento de rotación, podríamos observar en el cielo nocturno que de un día al siguiente estaría la misma estrella a la misma hora en el mismo lugar pero corrido solo un grado (esto es el grueso de un dedo índice con el brazo extendido) respecto del día anterior. Esta observación solo se puede realizar si tomamos como referencia alguna antena o algún poste que nos permita relacionar la observación de un día respecto al día siguiente. Este movi-

miento, es casi insignificante si no disponemos de una referencia y por lo tanto no se percibe a simple vista, pero lo que si notamos es que el cielo de un día del año, es completamente diferente después de tres meses o medio año. Después de tres meses la translación corresponde a 90° , o sea un $1/4$ que el cielo de vuelta y en medio año es $1/2$ vuelta es decir el otro lado del cielo, diametralmente opuesto. Este movimiento se ha visto enmascarado noche tras noche con el movimiento de rotación, pero aun en ese caso todos sabemos que observando a simple vista después de tres meses las constelaciones del cielo nocturno son muy diferentes.

Actividad 1: Paraguas de la Bóveda Celeste

Un sencillo paraguas nos puede permitir visualizar los movimientos de la bóveda celeste explicados con anterioridad. El paraguas usado de forma habitual sitúa sobre nuestras cabezas una bóveda donde podremos dibujar las constelaciones deseadas. Usaremos un paraguas negro de caballero y en el dibujaremos con pintura blanca (o con un corrector de los que usan los estudiantes).

En este modelo no dibujaremos todas las constelaciones, sino que solamente dibujaremos algunas constelaciones y solo las estrellas más importantes. No buscamos un resultado estético, sino un modelo de trabajo con el que podamos razonar.

Cada paraguas nos servirá para visualizar uno de los dos hemisferios. El punto de intersección entre el bastón y la tela del paraguas será el polo del hemisferio considerado. La zona del borde de la tela del paraguas (donde están los extremos de las varillas protegidas con un trocito de plástico), los tacos de las varillas, corresponderá aproximadamente al ecuador celeste.

Prepararemos pues dos paraguas uno para cada hemisferio.

En el hemisferio norte dibujaremos:

- En el entono del polo norte (cerca del eje del paraguas) la Osa mayor, Casiopea y se entiende que la estrella polar esta precisamente donde el palo del paraguas atraviesa al tela.
- En la zona del borde mas externo del paraguas dibujaremos 4 constelaciones, una para cada estación, la más típica y fácil de reconocer:
 - Primavera: Leo
 - Verano: Cisne

- Otoño: Pegaso
- Invierno: Orión

Sin duda se podrían elegir otras, pero deben estar distribuidas de forma más o menos equidistante. Todas situadas a unos 90° de la anterior.

En el hemisferio sur representamos:

- En el entono del polo sur (cerca del eje del paraguas) la Cruz del Sur y se entiende que el polo sur celeste está situado exactamente el palo del paraguas atraviesa al tela.
- En la zona del borde mas externo del paraguas dibujaremos cuatro constelaciones, una para cada estación, la más conocida:
 - Primavera: Acuario
 - Verano: Orión
 - Otoño: Leo
 - Invierno: Escorpión

La idea es elegir constelaciones grandes y que suelen estar sobre el horizonte. Esta propuesta puede adaptarse a cada caso.

Si la ciudad donde estamos situados está en la zona ecuatorial, entre 20° latitud norte y 20° latitud sur es necesario dibujar los dos paraguas. Si estamos situados en el hemisferio norte con latitud comprendida entre 30° y 90° bastara con el paraguas de este hemisferio y sucede lo mismo si estamos en el hemisferio sur.

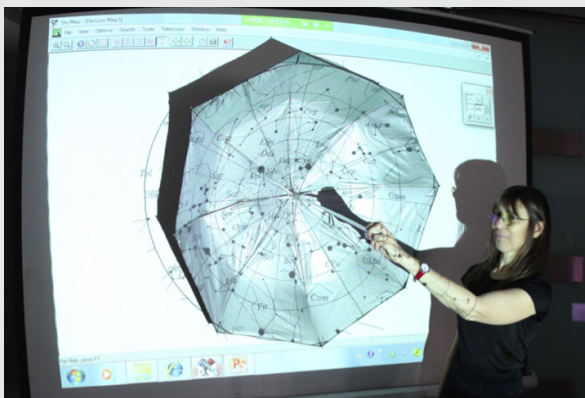


Fig.7: Proyección de las estrellas del hemisferio norte en una pantalla para dibujar las constelaciones deseados. Se recomienda preparar el modelo sobre un paraguas negro, aunque a la fotografía han utilizado uno de otro color con el fin de explicar el proceso.

Para dibujar los paraguas con el corrector o la pintura blanca es muy práctico usar el Stellarium o un programa similar y proyectarlo con un cañón o proyector de luz sobre la superficie del paraguas cuidando que el polo este exactamente en el punto de intersección del bastón del paraguas con la

tela. Vamos a proyectar el hemisferio correspondiente (figura 7). Una vez terminada cada paraguas lo podemos usar con los estudiantes situándolo por encima de nuestras cabezas (figura 8).



Fig. 8 Usando el paraguas del hemisferio norte con estudiantes

Situaremos el bastón del paraguas inclinado en la dirección del polo del hemisferio correspondiente. Imaginamos el suelo de la habitación a la altura de nuestro cuello, esto sería el horizonte, de forma que una parte de la tela del paraguas quedaría por debajo de este horizonte. Entonces distinguimos dos partes en este horizonte imaginado. La parte que está cerca del polo, donde el cielo que se ve a lo largo del año, es siempre más o menos el mismo (cuando miramos hacia la zona del bastón del paraguas intersección con la tela). La zona del ecuador queda más alta sobre el horizonte, es la parte más interesante ya que las constelaciones cambian a lo largo del año (figura 9).

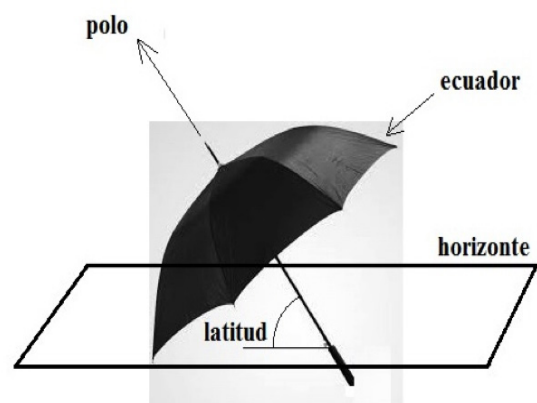


Fig.9: Bastón del paraguas inclinado en la dirección del polo de acuerdo con la latitud. Imaginamos el plano del horizonte que tapa parte del paraguas.

Hay que insistir que el modelo explica el movimiento de traslación. Imaginamos que no hay rotación por lo tanto equivale a observar cada día mas o menos a la misma hora. También hay que destacar que en este modelo simplificado visualizaremos el movimiento del cielo de 90° en 90° de

forma discreta, o sea cada 3 meses. Como evidentemente el movimiento del cielo es continuo y día a día, cuando se menciona que es visible una determinada constelación durante una estación hay que entender que es aproximadamente la constelación que veremos en el centro del horizonte en los meses centrales de la estación.

MODO DE USO

Vemos como utilizar el paraguas para entender el movimiento de translación.

Hemisferio Norte

Para fijar ideas supongamos que estamos en un lugar de latitud 40° norte. Situamos el paraguas del hemisferio norte con el bastón hacia el polo norte (inclinado 40° respecto del suelo) por encima de nuestras cabezas.

En el hemisferio Norte la estrella polar está prácticamente situada en el polo norte. Es fácil reconocerla a partir de la constelación de la Osa Mayor o de Casiopea. A partir de la Osa Mayor prolongamos 4 veces la distancia entre las dos estrellas del cuadrilátero que más alejadas de la cola de la constelación y se localiza la polar. Usando Casiopea, la polar se encuentra en la intersección de las dos bisectrices de cada una de las uves de la doble uve que representa Casiopea.

Horizonte Norte

Miramos hacia el área de estrella polar. Si introducimos una ligera rotación observamos las constelaciones de la Osa Mayor y Casiopea giran alrededor del polo norte a lo largo del año (figura 10).



Fig. 10: Posiciones relativas de la Osa Mayor en torno al polo norte a lo largo del año.

Comenzamos por situar la Osa Mayor arriba y Casiopea abajo (lo que sucede en primavera), giramos el mango del paraguas 90° hasta tener la Osa Mayor a la izquierda y Casiopea a la derecha (entonces tenemos la situación de verano). Giramos de nuevo 90° en la misma dirección, nos queda la Osa Mayor abajo y Casiopea arriba (es la posición que corresponde al otoño) y finalmente giramos de nuevo 90° dejando la Osa Mayor a la derecha y Casiopea a la izquierda (tal como está en invierno). Si giramos de nuevo se reproduce la situación inicial y comenzamos las 4 estaciones de un nuevo año (figura 10).

Tal como se ha descrito todo el proceso, se entiende que en esa zona del cielo, que se llama el horizonte norte (zona del horizonte que corresponde a la dirección norte), las constelaciones que vemos a lo largo del año son siempre las mismas y no hay más variación.

Horizonte Sur

Consideramos ahora la zona del ecuador, la zona de los tacos de las varillas. Las constelaciones en esta zona mirando hacia el horizonte sur varían según la época del año. La constelación central en primavera es Leo, entonces situamos el paraguas con Leo en la parte más alta sobre el horizonte. Giramos entonces el paraguas $\frac{1}{4}$ de vuelta, o sea 90° y tenemos sobre el horizonte sur, la constelación central de verano: el Cisne que constituye junto con Lira y Aquila el triángulo de verano. Con otro $\frac{1}{4}$ de vuelta estamos en otoño y la constelación central será el gran cuadrilátero de Pegaso. Y girando otros 90° estamos en invierno, y domina el cielo del horizonte la constelación de Orión con sus perros de caza.

Hemisferio Sur

Comenzamos por fijar ideas, a modo de ejemplo, una latitud del lugar de 40° sur. Situamos el paraguas del hemisferio sur con el bastón dirigido hacia el polo sur (inclinado unos 40° respecto del suelo) sobre nuestras cabezas.

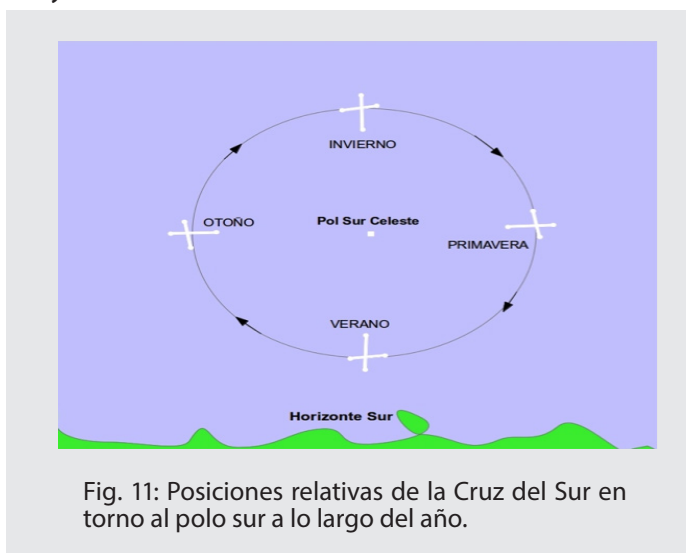
En el hemisferio sur no existe una estrella polar que permita visualizar la posición del polo sur. La Cruz del Sur es la constelación que se utiliza para señalar la posición del polo sur celeste; para ello debe prolongarse el eje mayor de la cruz en dirección al pie de la cruz 4,5 veces. Esta constelación da una vuelta en torno del polo en 24 hs. Su posición cambia a lo largo del año para la misma hora, como se ve en

la figura 11. Suponemos que es siempre la misma hora para obviar el movimiento de rotación y así observar solo el giro debido a la translación.

Horizonte Sur

Miramos hacia la zona del bastón del paraguas intersección con la tela, donde está el polo sur. Vamos girando lentamente el bastón y observamos que la constelación de la Cruz del Sur va girando en torno del polo sur a lo largo del año. Comenzamos por situar la Cruz del Sur arriba (lo que sucede en invierno), rotando el mango del paraguas 90° hasta tener la Cruz del Sur a la derecha del polo (entonces tenemos la posición de primavera). Giramos de nuevo 90° en la misma dirección, nos queda la Cruz del Sur abajo (es la posición que corresponde al verano) y finalmente giramos de nuevo 90° dejando la Cruz del Sur a la izquierda del polo sur (tal como está en otoño). Si giramos de nuevo se reproduce la situación inicial y comenzamos las cuatro estaciones de un nuevo año (figura 11).

Después del proceso descrito se entiende que en esa zona del cielo, llamado el horizonte sur (porque es el área del horizonte correspondiente al sur), las constelaciones que vemos durante todo el año son siempre los mismos y no hay más variación.



Horizonte Norte

Nos fijamos en la tela del paraguas en la zona ecuatorial, es decir, el horizonte del norte. Esta área es donde las constelaciones varían más. Las que son visibles en verano, no lo son en invierno. Zeus rey de los dioses en la mitología griega situó en el cielo el gigante Orión después de su muerte por una picadura de un escorpión. Y también, Zeus puso esta

constelación en el cielo, sino que situado diametralmente opuesto, para que no pudiera atacarlo de nuevo.

La constelación central durante la primavera es la constelación de Acuario. Giramos el paraguas de 90° , es decir, después de tres meses, tenemos Orión con sus perros en el horizonte norte, que es la constelación central de verano. Con otro $\frac{1}{4}$ de vuelta estamos en otoño y la constelación central es Leo. Si giramos el paraguas 90° es invierno, y tenemos la hermosa constelación de Escorpio como dominante en el cielo.

Conclusiones para ambos hemisferios

Siguiendo el esquema presentado anteriormente en ambos hemisferios durante dos horizontes podemos entender las observaciones debido al movimiento de translación.

Si queremos incluir el movimiento de rotación en la actividad, debemos tener en cuenta que además del movimiento anual describe un movimiento diario debido a la rotación de la Tierra hace. En un día, tanto la Osa Mayor y la Cruz del Sur dan un giro completo a sus respectivos polos.

Para dejar de lado el movimiento de translación es por eso que hemos simplificado la actividad imaginando que siempre llevamos a cabo la observación, al mismo tiempo, así que es como se elimina la rotación.

Cielos oscuros y contaminación lumínica

Para poder observar las estrellas, debemos tener un cielo oscuro. Sin embargo esto sólo es posible si nos apartamos de las ciudades. Los seres humanos hemos olvidado como es el cielo estrellado porque no podemos verlo. Este problema se debe a que la mayor parte de la iluminación pública derrocha enormes cantidades de energía iluminando hacia arriba, donde es innecesaria. La polución lumínica es una de las formas de contaminación ambiental menos conocidas. Afecta la visibilidad del cielo nocturno, impidiéndonos ver las estrellas, pero además altera el equilibrio del ecosistema y afecta la salud humana, pues atenta contra los relojes biológicos que están coordinados con los períodos de luz y de oscuridad en la Tierra. Hablar sobre este tema permite reconocer el problema, alertar sobre las consecuencias y buscar las soluciones.

Existen tres tipos de contaminación lumínica:

a) El resplandor es un fenómeno que se produce, en general, por la iluminación pública exterior. Se evidencia cuando tenemos la oportunidad de viajar de noche y acercarnos a una ciudad. Vemos que una envoltura de luz la rodea. La luz que produce el resplandor es luz desaprovechada, pues se gasta en iluminar hacia arriba, donde no se necesita y, por lo tanto, no sólo impedimos ver las estrellas, sino que estamos gastando energía innecesaria. Este tipo de contaminación se reduce eligiendo bien focos y bombillas y luminarias.

b) La intrusión: la luz exterior se proyecta en todas direcciones y en algunas de ellas entra, sin quererlo o pedirlo, a nuestras viviendas. Si la luz se proyecta en las habitaciones, nos veremos obligados a bloquear con cortinas las ventanas durante la noche.

c) El encandilamiento: este tipo de polución se vincula con las luces de los automóviles e incluso con iluminación exterior en las ciudades y viviendas. Se hace evidente en lugares con desniveles, pues el encandilamiento se produce cuando uno se encuentra de manera inesperada con un foco o reflector. En los últimos tiempos, los semáforos basados en luces LED pueden producir encandilamiento.

Si bien es posible a partir de diversos programas en Internet recopilar una serie de actividades prácticas que permiten trabajar este tema, propondremos sólo una que resulta interactiva y fácil de realizar en cualquier ámbito.

Actividad 2: Contaminación lumínica

Los objetivos de este taller consisten en mostrar el efecto contaminante de la iluminación sin blindaje, reconocer el efecto benéfico, desde el punto de vista astronómico, de la elección de un farol diseñado para el control de la contaminación lumínica y resaltar la posibilidad de mejorar la visión de las estrellas, sin dejar de iluminar aquellos lugares en donde no podemos tener oscuridad total.

Para llevar a cabo esta experiencia debe acondicionarse una caja de cartón de ciertas dimensiones, que permita que el alumno pueda mirar en su interior. Se dibujará una constelación que se seleccione (en este ejemplo es la de Orión) y se marcarán las estrellas como puntos primero, y luego se realizarán los agujeros teniendo en cuenta el diámetro de cada uno, según la magnitud estelar (figura 12a y 12b).

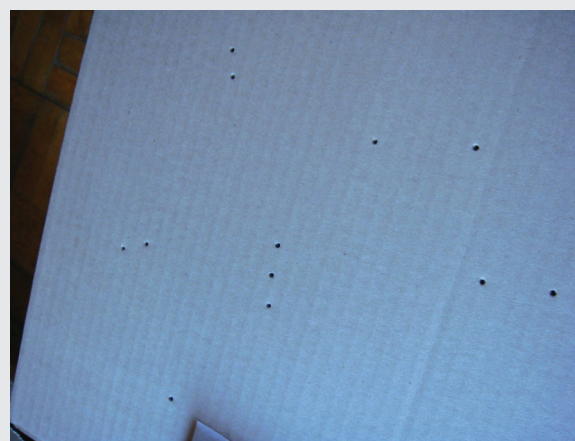


Fig. 12a y 12b: Caja de cartón, diseño de la constelación de Orión en una de las caras.

La constelación dibujada en la parte exterior de la caja debe ser la imagen especular de la misma, pues esta debe verse tal como aparece en el cielo cuando se mira en el interior de la caja.

La caja debe estar pintada de negro en el interior de manera que si se mira directamente en su interior, la constelación tendrá la apariencia de lo que se muestra en la figura 13. Las "estrellas", o puntos que las representan, se verán iluminadas por la entrada de la luz exterior dentro de la caja.

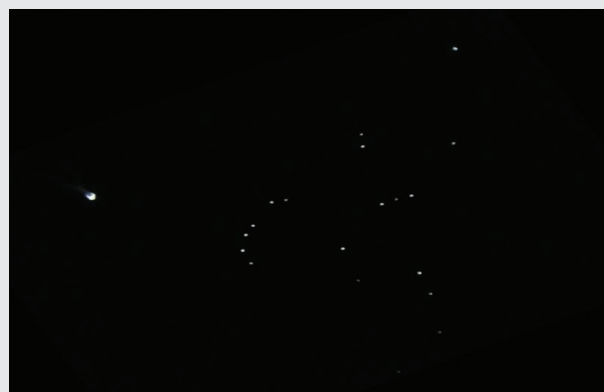


Fig. 13: Visión de Orión desde dentro de la caja. Cada agujero, representa una estrella.

Se preparan dos pelotas de ping pong, realizando un orificio que permita introducir una linterna en su interior, pero de diámetro tal que queden fijadas a la linterna. Una de la pelotitas se deja tal cual es, y la otra se pinta con esmalte sintético de cualquier color en el hemisferio superior, representando de esta manera, lo que se denomina “blindaje” e impide que la luz se proyecte hacia arriba (figuras 14a y 14b).



Fig. 14a: Pelota de ping-pong sin blindaje. Fig. 14b: Pelota de ping-pong con un hemisferio pintado.

Para realizar la experiencia, se deben seleccionar linternas en las que sea posible remover la parte superior protectora y dejar la bombilla a la vista (figuras 15a y 15b). La pelota de ping pong se inserta en la linterna y simula un farol tipo globo.

La experiencia se realiza en dos etapas: Primero fuera de la caja. En esta ocasión, deben apagarse las luces del lugar donde se realiza la experiencia. Se prueban ambos modelos, con la misma linterna para evitar variaciones en el flujo. Sin blindaje (figura 16a) y con blindaje (figura 16b) proyectando la luz que producen sobre una superficie lisa y cercana, por ejemplo la pared o un cartón.

En segundo lugar, se ve lo que sucede dentro de la



Fig. 15a: Quitamos el protector de la linterna. Fig. 15b: Linterna con la pelotita de ping pong simulando el farol.

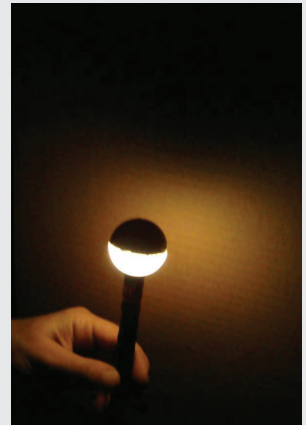


Fig. 16a: Linterna sin blindaje. Fig. 16b: Linterna con blindaje.

caja. La situación se puede observar en las figuras 17a y 17b, para los casos de linterna sin y con blindaje respectivamente. Se puede utilizar una cámara digital para fotografiar lo que sucede dentro de la caja, si no es posible que los participantes miren en el interior. Las luces externas, en la habitación en donde se realiza la experiencia deben estar encendidas.

Es posible advertir lo que sucede de manera muy clara. En la primera situación, en el caso de la iluminación exterior, se advierte el corte que produce

un farol con diseño para el control de la polución lumínica: la emisión hacia el cielo se ve notablemente reducida.



Fig. 17a: Aspecto del cielo con faroles sin blindaje.
Fig. 17b: Aspecto del cielo con faroles con blindaje.

En la segunda situación, al utilizar los dos tipos de linterna en el interior de la caja, estamos simulando la situación de un ambiente nocturno, la luz sin blindaje produce una iluminación extra sobre el cielo, el denominado resplandor, que dificulta la visión de las estrellas. En el caso de la cámara digital, al usar exposición automática, no es posible ni siquiera enfocar de manera adecuada a las estrellas.

Por el contrario, con la linterna adaptada para control de contaminación lumínica, es evidente que hacia abajo este artefacto no deja de ser efectivo, mientras que el cielo se ve mucho más oscuro y la cámara logra registrar de manera clara la constelación de Orión.

Bibliografía

- Berthier, D., Descubrir el cielo, Larousse, Barcelona, 2007.
- Bourte, P. y Lacroux, J., Observar el cielo a simple vista o con prismáticos, Larousse, Barcelona, 2010.
- García, B., Ladrones de Estrellas, Ed. Kaicron, Colección Astronomía, BsAs, 2010.
- Reynolds, M., Observación astronómica con prismáticos, Ed. Tutor, Madrid 2006.
- Roth, G.D. Guía de las estrellas y de los Planetas. Omega. Barcelona 1989.

ANEXO: Instrucciones para Stellarium 0.10.6.1

Para anclar o no las barras de herramientas (acercar el cursor a la esquina inferior izquierda)	
Ubicación. Se puede introducir por ciudades, por coordenadas o haciendo clic en un mapa	
Fecha y hora en la que se muestra el cielo	
Configuración de la vista del cielo. Tiene a su vez cuatro menús, que se explican a continuación	
Nº de estrellas, planetas... y que se vea o no la atmósfera	
Mostrar las líneas de coordenadas en el cielo, de las constelaciones... Tipo de proyección del cielo. Se recomienda la Estereográfica o la Ortográfica	
Mostrar el paisaje, el suelo, niebla.	
Nombres y figuras de las constelaciones y de estrellas según las culturas. Las más conocidas son las occidentales.	
Buscar un objeto (p.ej. Saturno, M13, NGC 4123, Altair)	
Configuración del idioma y de la información de los objetos mostrada en pantalla	
Ayuda (teclas de atajo, etc.)	
Ritmo normal del tiempo	
Aumentar velocidad del tiempo. Se puede dar varias veces	
Disminuir velocidad del tiempo.	
Volver a la hora actual	
Líneas de constelaciones	

Nombres de constelaciones	
Figuras de constelaciones	
Cuadrícula ecuatorial	
Cuadrícula acimutal+ horizonte	
Suelo/Horizonte	
Mostrar Puntos cardinales	
Atmósfera	
Nebulosas y nombres	
Nombres de los planetas	
Montura ecuatorial/acimutal	
Centrar sobre el objeto seleccionado	
Modo nocturno	
Pantalla completa/ ventana	
Ocular (como mirar al objeto seleccionado por un telescopio)	
Mostrar satélites artificiales en órbita	
Moverse por la vista	
ZOOM +	Repág
ZOOM -	Avpág
Definir el planeta seleccionado como desde el que se ve. Para regresar a la Tierra, buscar Tierra y luego CTRLG para seleccionar la Tierra como planeta desde el que se ve.	CTRL G
Dejar/omitir traza del recorrido de los planetas	May+T
Capturar pantalla	CTRL S ó <i>PrintScreen</i>
Salir (terminar con Stellarium)	ó CTRLQ

La Arqueoastronomía y su potencial educativo

Juan Antonio Belmonte

Instituto de Astrofísica de Canarias (España)

Introducción

Arqueoastronomía, astroarqueología, astronomía cultural, etnoastronomía, historia de la astronomía, ... En estos últimos años, el mundo científico en lengua castellana, y por extensión el público especializado, se ha visto invadido por la aparición de toda una serie de términos, unos ya viejos otros más nuevos, en que de una forma u otra se trataba de relacionar a la vieja ciencia de la astronomía con diversas ciencias del campo de las comúnmente denominadas humanidades (arqueología, historia, etnografía, antropología, historia del arte o filosofía, entre otras) o, más propiamente, ciencias sociales.

La creación por Michael Hoskin del suplemento Archaeoastronomy de la revista Journal for the History of Astronomy –desafortunadamente ya extinto– ha hecho que desde mediados de los ochenta sea “arqueoastronomía” el término triunfante. Desgraciadamente, la confusión en la terminología ha traído como consecuencia que un término completamente válido para relacionar la orientación de restos arqueológicos con la astronomía, como era el de astroarqueología, haya acabado definiendo aquellas prácticas que relacionan los restos arqueológicos de nuestro planeta con las visitas de supuestos seres extraterrestres, en una repetición de un fenómeno habitual como es la apropiación de terminología científica por parte de pseudocreencias, supercherías y supersticiones, que con el paso de los siglos ha hecho que, por ejemplo, los astrónomos renegemos de la palabra lógica para definirnos, “astrólogos” (ver sino, biólogos, ecólogos, antropólogos, enólogos y un largo etcétera de “tratadores de”... estrellas, sería en nuestro caso) en beneficio de un prosaico “denominadores de estrellas”.

Pero, ¿qué es entonces la arqueoastronomía? En la *History of Astronomy: an Encyclopedia*, el Director del Observatorio Griffith de Los Angeles, el “arqueoastrónomo” Edwin Krupp, propone la siguiente definición del término:

la arqueoastronomía es el estudio interdisciplinario de la astronomía prehistórica, antigua y tradicional en todo el Mundo, en el marco de su contexto cultural. En este estudio se incluyen tanto fuentes escritas como arqueológicas, abarcando los siguientes tópicos: calendarios; observación práctica; cultos y mitos celestes; representación simbólica de eventos, conceptos y objetos astronómicos; orientación astronómica de tumbas, templos, santuarios y centros urbanos; cosmología tradicional y la aplicación ceremonial de tradiciones astronómicas.

Se puede comprobar que la definición es bastante amplia y variados los tópicos que abarca. Sin embargo, la “arqueoastronomía” definida de esta forma deja de lado dos áreas importantísimas en que la astronomía se relaciona de lleno con las ciencias sociales, la propia historia de la astronomía y la etnoastronomía. La primera, que tiene ya una larga tradición, se ocuparía propiamente del avance histórico de la astronomía como disciplina científica y de la evolución del pensamiento astronómico desde el punto de vista de las ciencias experimentales y, como tal, no debiera remontarse mucho más allá de la Grecia clásica. La etnoastronomía, por su parte, se ocuparía del estudio desde el punto de vista astronómico de las tradiciones orales de culturas aun existentes en la actualidad y, en opinión de algunos investigadores, de las fuentes escritas (crónicas de conquista, estudios antropológicos antiguos) de culturas extintas, abarcando una serie de tópicos que, en gran parte, coinciden con los de la propia arqueoastronomía. En realidad, las fronteras entre estas tres disciplinas son extremadamente tenues y, de hecho, los cruces de información entre ellas son más la norma que la excepción. Por este motivo, hoy se defiende el uso de un término globalizador, al que se ha dado en llamar “astronomía cultural”, que trataría de incluir cualquier tipo de estudios o línea de investigación en que se relacionase a la astronomía con las ciencias sociales. De ahí, que la agrupación de especialistas de mayor prestigio en el campo se denomi-

denomine "Sociedad Europea de Astronomía Cultural (SEAC)" www.archeoastronomy.org.

¿Dónde se ubica la arqueoastronomía?

Muchas cosas han cambiado en esta disciplina y una de las más importantes ha sido sin duda la sustitución del lenguaje "astronómico" por otro más próximo desde el punto de vista epistemológico al de las ciencias sociales. No nos engañemos, la arqueoastronomía no es una línea de investigación más dentro de la astrofísica moderna, ni sirve a su fin fundamental cual es el avance del conocimiento físico del Universo. Hoy, por el contrario, la arqueoastronomía es una especialidad que se enmarca de lleno en los estudios antropológicos, al servicio de disciplinas como la arqueología del paisaje (en el sentido totalizador del término paisaje), la historia de las religiones o, lo que viene a ser casi lo mismo, la arqueología del poder. Por tanto, un astrónomo formado únicamente y principalmente como físico o matemático difícilmente podrá encontrar una respuesta adecuada a la mayor parte de las preguntas que se han de plantear o será incluso incapaz de llegar a plantearlas. Por ello es importante que desde jóvenes, aquellas personas interesadas por la astronomía se familiaricen con las raíces de la misma y como las diferentes culturas han usado la observación del cielo para definir su visión del universo que les rodea, o cosmovisión.

El tan cacareado carácter interdisciplinario de la arqueoastronomía se debe a la necesidad de dominar una serie de técnicas difícilmente accesibles a los antropólogos, arqueólogos e historiadores, como son la astronomía de posición o la mecánica celeste, cuyas bases epistemológicas, al igual que las del método científico, o herramientas básicas (como la trigonometría esférica), estos especialistas en su mayoría desconocen. Siempre se ha argumentado que la colaboración entre arqueólogos y astrónomos es necesaria para llevar adelante una investigación adecuada en el marco de la arqueoastronomía. Sin embargo, mi opinión actual, después de más de dos décadas de experiencia en el campo, y la de muchos colegas, es que lo que en realidad hace falta es un reciclaje casi completo del astrónomo o del antropólogo de turno que deberá convertirse en un verdadero arqueoastrónomo, olvidando muchas de las referencias epistemológicas aprendidas en sus largos años de formación y aprendiendo otras nuevas que le eran completamente desconocidas.

No todo lo que se estudia en arqueoastronomía ha de tener necesariamente el marchamo de interdisciplinariedad, aunque si son necesarias ciertas dosis de multidisciplinariedad.

La arqueoastronomía tiene otro problema importante y es el quedar definida en esa especie de tierra de nadie en que ni los astrónomos, o astrofísicos, la reconocen como propia (aunque esto, afortunadamente empieza a cambiar), ni los arqueólogos o historiadores acaban de comprender muy bien cual es su utilidad, salvo en casos muy puntuales, al contrario de lo que ocurre con otras facilidades de las ciencias experimentales como, por ejemplo, el uso del C14 en la datación, que son ampliamente aceptadas. Por este motivo, la arqueoastronomía es quizás la única disciplina científica cuyo título (el de arqueoastrónomo) pueden arrojarse sin rubor supuestos investigadores de todo tipo que usan, y abusan, de sus poderosas herramientas físicas y matemáticas para proponer teorías históricas absolutamente descabelladas, para horror de arqueólogos y antropólogos, y para nuestra desesperación al comprobar como nuestros esfuerzos por obtener un cierto grado de reconocimiento pueden quedar en agua de borrajas por unos pocos miembros destacados de lo que los científicos británicos definen como el *lunatic fringe*.

La frontera entre lo que es ciencia y lo que no, se debiera basar en la aplicación de reglas tan básicas como la Navaja de Ockham, la formulación más sencilla del Principio de Economía (antes dos respuestas posibles a un problema científico, la más sencilla suele ser la verdadera) que, sin embargo, hemos de reconocer que no son de aplicación universal.

La Arqueoastronomía y NASE

El potencial de la Arqueoastronomía en la Didáctica de la Astronomía es indiscutible pues puede, y debe llegar, a los corazones y las conciencias de los jóvenes aprendices que ven reflejada a su propia cultura en la forma de entender el cosmos se sus antepasados. En este sentido puede ser importante una relación directa con su entorno inmediato que perciben como muy próximo frente a la lejanía aparente de la bóveda celeste y del universo en general. En este sentido, puede ser interesante tanto realizar ensayos o experimentos de arqueoastronomía como de etnoastronomía o una combinación de ambos.

Por un lado es ciertamente interesante la posibilidad de diálogo con sus mayores para escudriñar sus conocimientos tradicionales del cielo, en particular en sociedades agropecuarias o de cazadores recolectores. En sociedades urbanas modernas este conocimiento está muy mediado por los estudios y los medios de comunicación. En este sentido, se adjunta una entrevista tipo que podría servir de ejemplo al tipo de preguntas que se podrían realizar (ver Apéndice 1).

Por otro lado, es casi seguro que en el entorno inmediato de los jóvenes aprendices de astronomía habrá una serie de construcciones que podrían tener un marcado carácter simbólico ya tengan una función religiosa o profana. Esos edificios, o la planificación espacial y urbana en que se encuentren, son potenciales objetos de experimentación arqueoastronómica. Citemos algunos ejemplos:

- Iglesias en un entorno cristiano.
- Mezquitas en un entorno musulmán.
- Templos en un entorno hindú, budista o sintoísta (pagodas o gopuranes incluidos).
- Tramas urbanas, especialmente aquellas claramente organizadas con tramas ortogonales (muy frecuentes en todo el Mundo).
- Santuarios de sociedades indígenas (e.g. Polinesia o América).
- Otros lugares de culto en sociedades tribales.
- Monumentos antiguos si los hubiere.

También puede estudiarse la iconografía astronómica existente en estos lugares, o asociada a ellos. En este ámbito se podría incluir, con la debida precaución, el análisis de las estaciones de grabados rupestres que, con frecuencia, muestran representaciones astrales muy elaboradas. Por tanto, la astronomía cultural puede convertirse en referente crucial para acercar la astronomía a la población y, en particular a los jóvenes.

Apéndice I

(Adaptado de *El Cielo de los Magos*)

ENTREVISTA TIPO PARA TRABAJO DE CAMPO ETNOASTRONÓMICO

El conjunto de preguntas propuestas es de carácter general, pudiéndose aplicar en la mayoría de los casos. Sin embargo, la experiencia demuestra que, en este tipo de investigaciones, una vez metidos en la conversación, surgen infinidad de preguntas más concretas y relacionadas de forma

más directa con el tema que se está tratando en cada momento. En consecuencia, aun ajustándose al patrón propuesto, es de esperar que la mayor parte de las entrevistas tenga siempre un carácter más abierto.

1. Primero se explicará a los entrevistados lo que queremos saber y ¿por qué?, comenzando a hacer preguntas de carácter general como:

- ¿Vds. aquí se fijan en el cielo para algo?
- ¿Lo utilizan como guía, como señal para algo?

2. Después se particularizará en cada uno de los objetos susceptibles de uso con fines predictivos:

a) Preguntas centradas en las Estrellas

- ¿Se guían con las estrellas por la noche?
- ¿Qué estrellas conocen en el cielo?
- ¿Vds. conocen "tal o cual" estrella (*)?
- Ahora, se harán preguntas relacionadas con el lugar y la época del año en que salen y se ponen las estrellas mencionadas, así como de sus características particulares, con el fin de intentar identificar claramente a qué estrella o estrellas se están refiriendo y comprobar si se fijan en sus movimientos.
- ¿Recuerdan otros nombres de agrupaciones de estrellas?
- ¿Les indican algo las estrellas?
- ¿La lluvia tiene relación con alguna estrella?
- ¿Se levantaban por la noche o por la mañana temprano para ver las estrellas?
- ¿Se fijan en las estrellas para el trabajo en el campo?
- ¿Basándose en qué: ... según se vieran o no, según la posición, etc. ... ?
- ¿Cómo hacen para saber la hora por la noche?
- ¿Pasa algo cuando sale "tal o cual estrella"?
- ¿El ganado hace algo o le ocurre algo asociado a las estrellas?
- ¿El ganado se pone inquieto o nervioso con/por las estrellas?

(*) Nota: Se hará referencia concreta a alguna estrella, de las conocidas por entrevistas anteriores o bien recogidas en la Bibliografía anterior sobre el tema.

b) Preguntas relacionadas con la Luna:

- ¿Vds. se fijan en la Luna?
- ¿Utilizan la Luna como guía para algo?
- ¿Se fijan por donde sale o se pone la Luna?
- ¿Se fijan que posición, que forma tiene, o en qué fase está la Luna?
- ¿La posición de la Luna indica algo?

- ¿Se fijan en la Luna para las tareas del campo?
- ¿Se fijan en alguna Luna en especial?
- ¿Hay alguna Luna más importante que otra?
- ¿Tiene algo que ver la Luna con la lluvia?
- ¿Influye la Luna en los animales?

c) Preguntas relacionadas con el Sol:

- ¿Vds. se fijan en el Sol?
- ¿Utilizan el Sol como guía para algo?
- ¿Se fijan por donde sale o se pone el Sol?
- ¿Se guían por el Sol para saber la hora? ... ¿Cómo?
- ¿Ha oído algo sobre ver bailar el Sol?

d) Preguntas relacionadas con fenómenos meteorológicos:

- ¿Como saben Vds. si va a llover o no?
- ¿Tienen Vds. alguna señal de algo, en algún sitio, que indique que va a llover?
- ¿Que otras señales o signos conocen relacionados con los vientos, las nubes o las cosas del cielo?
- ¿Había alguna señal con tal o cual montaña?
- ¿Tiene alguna forma de saber qué tiempo va a hacer en la mar (a pescadores)?
- ¿Vds. mirando el cielo hay algún signo o alguna señal que les indique que tiempo va a hacer, si va a llover, (*)?
- ¿Cuándo, en que época (*)?

(*) Nota: La intención con estas dos últimas preguntas es descubrir si conocen las Cabañuelas, sin necesidad de citar expresamente este apelativo. En caso contrario

e) Preguntas relacionadas con las Cabañuelas y los Aberruntos (predicciones meteorológicas):

- ¿Tienen alguna época en que se fijan para saber que tiempo va a hacer el resto del año?
- ¿Conocen las Cabañuelas?
- ¿Que sabe de las Cabañuelas?
- ¿En que fecha?
- ¿En que consiste?
- ¿Conoce algún Aberrunto?
- ¿Que significaba?
- ¿Funcionan o no funcionan?
- ¿Hay alguna Cabañuela que sea más exacta?
- ¿Hay alguna Cabañuela asociada al Sol o a la Luna?

f) Preguntas relacionadas con las Fiestas y el Santoral:

- ¿Que fiestas tiene aquí?
- ¿Cuándo son?
- ¿Cuáles son las más importantes?
- ¿Cuál es la Patrona, o el Patrón?

- ¿Que se hace?
- ¿Se hace algo especial en ellas?
- ¿Se hace algo relacionado con el cielo en esa fecha?

3. Preguntas de carácter general, a realizar de forma intercalada, a lo largo de la entrevista:

- ¿Recuerdan alguna copla, cantar o refrán relacionado con las cosas del cielo?
- ¿Tiene Vds. alguien que sepa predecir el tiempo?
- ¿Le dan algún nombre?
- ¿En muy exacto?
- ¿Que otras señas conocen?
- ¿Se siguen Vds. fiando de todas esas señas?
- ¿Todavía se cumplen esas señas?
- ¿Hoy en día, se siguen fijando en esas cosas?
- ¿A Vds. les parece que las señas son verdad?
- ¿De quién aprendió todo esto?
- ¿Dónde nació? ¿Dónde se crio? ¿De donde era su (padre, abuelo, suegro,)?

Apéndice II

(Adaptado de La Orientación como señal de identidad cultural: Las Iglesias Históricas de Lanzarote)

Resumen

La orientación de las iglesias cristianas es un elemento distintivo de su arquitectura que repite patrones desde época paleocristiana. Existe una tendencia general a orientar sus ábsides en el rango solar, con una predilección de las orientaciones cercanas al este geográfico (equinoccio astronómico), aunque las alineaciones en sentido opuesto, con el ábside a poniente, si bien resultan excepcionales pues no siguen el patrón canónico, no son inusuales.

El caso de las iglesias construidas en el noroeste de África antes de la llegada del Islam resulta paradigmático en este sentido y pudiera reflejar tradiciones anteriores. El Archipiélago canario representa el extremo occidental de esa koine-cultural norteafricana, por lo que se ha considerado relevante abordar un estudio de un conjunto compacto de iglesias antiguas en alguna de las islas, eligiendo la de Lanzarote. Se ha medido la orientación de un total de 30 iglesias edificadas con anterioridad a 1810, así como algunos ejemplos más de época posterior. La muestra indica que se siguió un patrón de orientación determinante en la isla, pero al contrario que la norma encontrada hasta ahora

en el resto del orbe cristiano, este prototipo es doble. Por un lado, aparece la representativa orientación a levante (o poniente), pero la muestra tiene además un patrón marcado de orientaciones hacia el norte-noreste exclusivo, por ahora, de Lanzarote. Se analiza el porqué de esta extraña regla, considerándose varias posibilidades desechadas en su mayoría. Encontramos que la explicación puede ser muy prosaica, de forma que, a veces, las necesidades terrenales resultan más relevantes y decisorias que las necesidades del culto.

Introducción: prolegómenos

El estudio de la disposición de las iglesias cristianas ha interesado desde tiempos pretéritos y recientemente ha cobrado un nuevo auge en la literatura especializada al ser éste un factor representativo de su arquitectura. Según los textos de los escritores y apologetas cristianos tempranos, las iglesias debían situarse siguiendo una determinada orientación, es decir, el sacerdote tenía que situarse mirando hacia el oriente durante los oficios. Así lo reconocen Orígenes, Clemente de Alejandría y Tertuliano y el Concilio de Nicea (325) determinó que así fuera. San Atanasio de Alejandría, también en el siglo IV, expresa que el sacerdote y los participantes deben dirigirse hacia el este, de donde Cristo, el Sol de Justicia, brillará al final de los tiempos (*ecclesiarum situs plerumque talis erat, ut fideles facie altare versa orientem solem, symbolum Christi qui est sol iustitia et lux mundi interentur [...]*); para un análisis profundo de las fuentes tempranas y de los métodos de orientación puede verse Vogel (1962).

Sin embargo, estas prescripciones no se muestran del todo claras posibilitando optar entre diversas interpretaciones: ¿se orienta hacia la salida del sol el día que comienza la construcción de la iglesia? ¿O hacia la salida del sol otro día que se considere importante, como puede ser el del día del santo patrón de la iglesia? O bien la orientación hacia el este, ¿debe considerarse en sentido estricto? ¿Se orientaban las iglesias hacia la salida del sol en el equinoccio? En ese caso, ¿hacia qué equinoccio? En un principio, las basílicas cristianas tempranas no se construían con el ábside, o la cabecera de la iglesia hacia el este. A este respecto, Delgado-Gómez (2006) indica que de las 20 primeras basílicas cristianas construidas durante el tiempo de Constantino y sus sucesores en Roma, Jerusalem, Constantino-

pla y el Norte de África, 18 se sitúan aproximadamente en la línea este-oeste, pero el ábside de 11 de ellas está dirigido hacia el oeste. Sin embargo, es interesante destacar que en estos casos la cátedra y el sacerdote se posicionan contemplando el este, pues entonces el altar está situado entre él y las personas asistentes.

Entre los siglos III y VII se precisan las recomendaciones y así las Constituciones Apostólicas indican que las iglesias se deben construir orientadas hacia el este (Const. Apost., II, 7). En el siglo V, Sidonio Apolinar y Paulin de Nola indican que el ábside debe mirar hacia el este, al equinoccio, algo confirmado más tarde tanto por el Papa Virgilio como por Isidoro de Sevilla en sus *Etymologiae* (XV, 4; McCluskey 1998). Esto sería confirmado durante la Edad Media plena por Honorio Augustodunense (ss. XI-XII, [...]) *ecclesiae ad orientem vertuntur ubi sol oritur [...]* y por otros autores como Guillermo Durando (ss. XII-XIII, [...]) *versus orientem, hoc est, versus solis ortum aequinoctialem, nec vero contra aestivale solstitium [...]*, que claramente indica la dirección a seguir, el equinoccio, y la que evitar, el solsticio. La orientación hacia el este tiene una clara simbología, como comentamos antes. Es en esa dirección por donde sale el sol y por tanto Cristo, como Sol de Justicia, surgirá desde allí en el Juicio Final (McCluskey 2004, 2010). Por el contrario, la no preferencia de los solsticios podría estar ligada a la importancia de estas fechas en el periodo anterior y a los numerosos templos paganos orientados en esas direcciones (véase, por ejemplo, Belmonte, 2012).

Sin embargo, en estas prescripciones, todavía persiste un tanto de ambigüedad al orientar las iglesias hacia el este, pues cabría preguntarse hacia qué equinoccio hacerlo. Como menciona McCluskey (2004) existen varias posibilidades: el equinoccio vernal romano ocurría en el 25 de Marzo, mientras que el griego acontecía el 21 de Marzo –como quedó plasmado en el Concilio de Nicea– ; pero se pueden usar otras definiciones, tales como la entrada del sol en el signo de Aries o el equinoccio de otoño. De cada una de estas definiciones se obtendrían fechas, y por tanto orientaciones, ligeramente diferentes (Ruggles 1999, González-García & Belmonte 2006).

Otro punto importante a considerar es el uso del Calendario Juliano durante la Edad Media y buena parte de la Moderna. La naturaleza de éste haría que, si nos fijamos en un equinoccio calendárico –es decir en una fecha concreta– tal mo-

mento se desplazaría con respecto a las estaciones, algo que se vería reflejado en un cambio sistemático de orientación, si ésta se hacía por observación de la salida del sol en ese día.

El estudio de las orientaciones de las iglesias medievales europeas es, junto con las pirámides de Egipto y los megalitos europeos, uno de los ensayos más antiguos que se han trabajado en Arqueoastronomía. González-García (2013) ha llevado a cabo recientemente una recopilación de los trabajos en este campo. En él se aprecia que las prescripciones para la orientación hacia el oriente se siguieron de forma bastante sistemática en toda Europa, al menos durante la Edad Media, como puede verse en la figura 1. Todas las zonas estudiadas por González-García (2013) siguen ese patrón de orientaciones con un claro máximo predominante centrado en el este, destacando que en numerosas ocasiones, sobre todo en Europa occidental, tal máximo está ligeramente desplazado hacia el norte respecto al este astronómico, tal vez indicando un uso de fechas concretas para el equinoccio (25 de Marzo) que con el paso del tiempo se van trasladando, como se indicó anteriormente, aunque en cada región concurren características particulares.

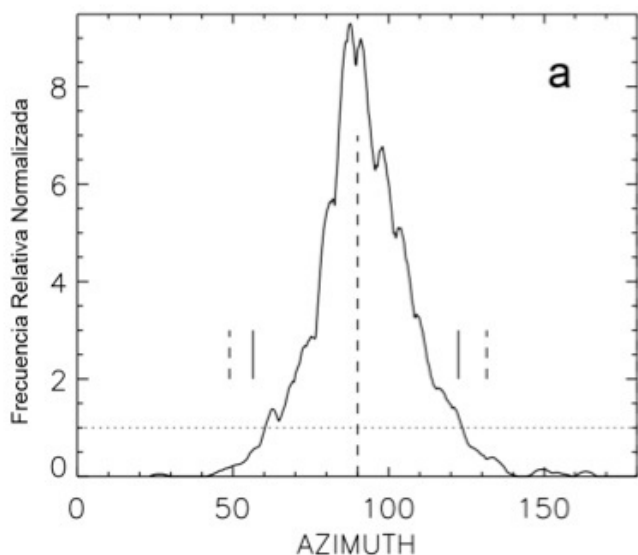


Fig.1: Histogramas de acimut de orientación de una muestra muy significativa de iglesias medievales europeas. El diagrama de acimut incluye las medidas de 1274 iglesias obtenidas de la literatura. Nótese la concentración de orientaciones hacia el este, aunque ligeramente desplazadas respecto al equinoccio astronómico ($\delta=0^\circ$)

Resulta interesante destacar que una constante en la literatura sobre la orientación de las iglesias es que éstas se orientan hacia la salida del sol en la efemérides del santo patrón (lo que no parece en absoluto ser el caso de las iglesias

lanzaroteñas, como veremos). Sin embargo, en los escritos tempranos y hasta bien entrada la Edad Media no existe un refrendo epigráfico para tal afirmación. Hasta la aparición de las órdenes religiosas en la Baja Edad Media no se constata tal tendencia. Los trabajos revisados por González-García (2013) indican que para áreas de Alemania y tal vez de Inglaterra y Francia podría existir un interés por ciertos santos en algunos monumentos, si bien estos edificios son en general iglesias monacales románicas o catedrales góticas, y por lo tanto tardías. Un caso interesante y bien documentado se da en Eslovenia donde Čaval (2009) ha encontrado evidencias de una predilección especial por la festividad denominada de la Cátedra de San Pedro, inclinación que se ve reflejada en la orientación de un número significativo de iglesias en la dirección del orto solar de ese día. McCluskey (2004) indica que algo similar ocurre en Inglaterra con la orientación de las iglesias románicas donde, tal vez, las iglesias con advocaciones marianas y algunos pocos santos más pueden seguir esta norma de forma complementaria a la orientación hacia el este.

En este contexto, y dado el objeto del presente estudio, resulta interesante destacar que, salvo un número pequeño de trabajos dedicados a iglesias particulares, a sus orientaciones y a posibles eventos de iluminación, sobre todo en Inglaterra y Centroeuropa, no existen estudios sistemáticos sobre la orientación de los templos en períodos posteriores a la Edad Media, como el que nos ocupa, pues como veremos, la gran mayoría de las iglesias y ermitas de Lanzarote empezaron a erigir décadas después de la conquista y colonización de la isla por los normandos al servicio de la corona de Castilla en el siglo XV.

Curiosamente, una excepción a la norma de orientaciones hacia levante es el Norte de África, donde las iglesias se construyeron en direcciones opuestas. Los datos que muestra la figura 2 fueron obtenidos por Estéban et al. (2001) y Belmonte et al. (2007), así como otros no publicados con anterioridad (González-García 2013) e incluye un total de 23 iglesias, en particular de África Proconsular y Tripolitania, posibles tierras de origen de la población aborigen canaria (Belmonte et al. 2010). Es interesante observar que se constata un buen número de iglesias con orientaciones hacia poniente, costumbre usual en los momentos tempranos del cristianismo, como se señaló anteriormente. También destaca que la mayoría de las iglesias se ordenan dentro del rango solar,

con concentraciones en los equinoccios y los solsticios, lo que podría dar claves sobre el proceso de cristianización en esta región.

En España, tanto en la Península Ibérica como en los dos archipiélagos, si bien existen informaciones de eventos particulares de iluminación dentro de templos románicos en momentos especiales como el equinoccio (como en Santa Marta de Tera o en San Juan de Ortega, en las provincias respectivas de Zamora y Burgos), la cuestión de la orientación de las iglesias ha sido poco investigada en general, desde un punto de vista estadístico, lo que ha llevado a afirmaciones de tipo un tanto peregrino respecto a la posible causa de las desviaciones de algunas iglesias con respecto a la orientación canónica (véase por ejemplo Godoy-Fernández, 2004). Pérez-Valcárcel (1998) ha investigado la orientación de 187 iglesias románicas del Camino de Santiago. Aunque sus datos no incluyen la medida de la altura angular del horizonte, algo desgraciadamente muy común en otros estudios europeos, lo que sí parece claro es que no se establece una relación general entre la orientación de estas iglesias y la salida del sol en la fecha del santo patrón de advocación de la iglesia.

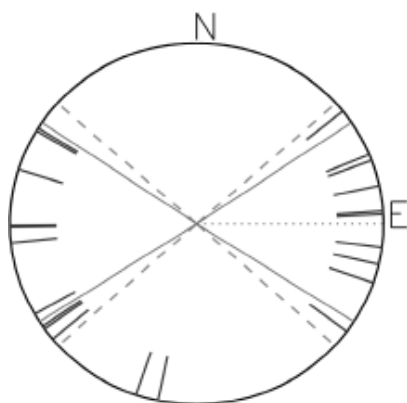


Fig. 2: Diagrama de orientación del ábside de 23 iglesias tempranas del Norte de África. Salvo dos localizadas en Sbeitla que siguen el patrón ortogonal de la ciudad romana, todas las demás se orientan dentro del rango lunisolar, aunque el rango occidental es mucho más frecuente de lo habitual.

Nuestro equipo ha decidido iniciar un proyecto a gran escala tanto en la península como en el Archipiélago Canario. En este último, este trabajo es el primer estudio sistemático desarrollado. Sin embargo, dentro de un programa más amplio para medir las orientaciones de las iglesias prerrománicas del territorio peninsular de forma sistemática, González-García et al. (2013) han dedicado una especial atención a las iglesias del periodo asturiano y a su interacción con el poder musulmán dominante en el sur de la Península.

En concreto, encuentran que las 13 iglesias del periodo aún existentes en Asturias poseen una orientación canónica, con el ábside hacia oriente, aunque desviada en general varios grados al norte del este. Además, los autores han encontrado que las mezquitas de Al-Ándalus, si bien podrían haberse orientado hacia La Meca, con quiblas que podrían haber sido compatibles con las alineaciones canónicas de las iglesias, siguen sin embargo otras disposiciones. Por un lado, un buen número de mezquitas se orientan hacia el SE, mientras que otras siguen la de la Mezquita de Córdoba, ambas disposiciones permitidas por el Islam. Así, parecería que las mezquitas “evitan” orientaciones posibles que puedan confundir sus templos con iglesias, mientras que las iglesias asturianas, y tal vez las mozárabes inmediatamente posteriores también, tenderían a evitar aquellas posiciones que confundan estos templos con mezquitas en un ejemplo de la interacción de religión, poder y astronomía. Por tanto, vemos que ante circunstancias excepcionales, los patrones canónicos pueden ser alterados.

Por último, García-Quintela et al. (2013) han investigado la introducción del cristianismo en el noroeste de la Península y la posible sustitución de elementos culturales indoeuropeos (célticos) por factores cristianos, mediante la introducción de lo que denominan un “paisaje mártir”: a través de las orientaciones de las iglesias y la cristianización de sus entornos, así como de la creación de mitos y relatos que canalizan, modifican o sustituyen a los posibles cultos paganos. Sería pues interesante analizar esta misma fenomenología en el archipiélago canario y, en particular, en la isla de Lanzarote, un caso especialmente llamativo dado que fue la primera en ser colonizada por Europa y su tamaño y número de núcleos poblacionales permitiría un estudio de una muestra estadísticamente significativa en un espacio muy compacto y reducido.

Ejemplo: Las iglesias y ermitas de Lanzarote. Conclusiones

Tras la conquista y colonización de la isla canaria de Lanzarote por parte de la población europea a principios del siglo XV, se comenzó en los siglos inmediatamente posteriores la colonización a gran escala de la isla con el establecimiento de pequeñas haciendas y caseríos, junto a algunas villas mayores como Tegui o

Femés, donde se inició la construcción de un número no desdeñable de templos cristianos que ilustraban la nueva situación social y religiosa.

En algunos pocos lugares, es posible que se orientasen los edificios con patrones de imitación del culto aborigen. En otros, se respetó la tradición canónica de alinear los templos a levante (con algunas excepciones a poniente) aunque con un grado de libertad mucho mayor que el habitual. En este sentido, se debe destacar que solo una iglesia de Lanzarote, la de Mala, parece presentar una orientación compatible con el orto solar en el día de la advocación (mariana) del templo (figura 3).



Fig. 3: La iglesia de Ntra. Señora de las Mercedes en Mala es la única iglesia de la isla orientada equinoccialmente de forma precisa y que además podría estar orientada al orto solar el día de su advocación mariana (24 de septiembre), una tradición aparentemente extraña al entorno isleño de Lanzarote.

Finalmente, en Lanzarote hay un número estadísticamente significativo de iglesias orientadas en dirección norte-noreste, lo que resulta una notoria excepción a la regla. Se han analizado diferentes posibilidades para explicar esta anomalía, llegando a la conclusión de que la respuesta más plausible es a su vez la más prosaica. Este patrón de orientación parece obedecer al deseo de evitar los fuertes vientos dominantes en la isla, procedentes precisamente de esa dirección, y, en particular, soslayar las molestias causadas por la arena desplazada por el viento en aquellas edificaciones más cercanas o limítrofes con El Jable.

Bibliografía

- Belmonte J.A., Pirámides, templos y estrellas: astronomía y arqueología en el Egipto antiguo, Crítica, Barcelona, 2012.
- Belmonte, J.A. y Sanz de Lara M., El Cielo de los Magos, La Marea, La Laguna, 2001.
- Belmonte J.A., Tejera A., Perera M.A. y Marrero

R., "On the orientation of pre-Islamic temples of North-west Africa: a reappraisal. New data in Africa Proconsularis", Mediterranean Archaeology and Archaeometry6, 3: 77-85. 13, 2007.

- Belmonte J.A., Perera Betancort M.A. y González García A.C., "Análisis estadístico y estudio genético de la escritura líbico-bereber de Canarias y el norte de África", en VII Congreso de patrimonio histórico: inscripciones rupestres y poblamiento del Archipiélago Canario, Cabildo de Lanzarote, Arrecife, (2010).

- Čaval, S. (2009). "Astronomical orientations of Sacred Architecture during the Medieval period in Slovenia", en J.A. Rubiño-Martín, J.A. Belmonte, F. Prada and A. Alberdi (eds.), Cosmology Across Cultures, 209-19. San Francisco. Astronomical Society of the Pacific.

- Estéban, C., Belmonte, J.A., Perera Betancort, M.A., Marrero, R. y Jiménez González, J.J., "Orientations of pre-Islamic temples in North-West Africa", Archaeoastronomy26, S65-84, (2001).

- Gangui A.; González García A.C.; Perera Betancort M.A. y Belmonte, J.A., La orientación como una seña de identidad cultural: las iglesias históricas de Lanzarote, Tabona en prensa, 2015.

- García Quintela, M.V., González-García, A.C. y Seoane-Veiga, Y., "De los solsticios en los castros a los santos cristianos: la creación de un paisaje mártir en Galicia", Madrider Mitteilungen, 2013.

- González-García, A.C. y Belmonte, J.A., "Which Equinox?" Archaeoastronomy, The Journal of Astronomy in Culture20. 97-107, 2006.

- González-García, A.C., Belmonte J.A. y Costa-Ferrer, L., "The orientation of pre-Romanesque churches in Spain: Asturias, a case of power reaffirmation", en M.A. Rappenglueck, B. Rappenglueck and N. Campion (eds.), Astronomy and Power. British Archaeology Reports, 2013.

- Godoy Fernández, C., "A los pies del templo. Espacios litúrgicos en contraposición al altar: una revisión", Antigüedad Cristiana 21, 473-89, 2004.

- Krupp E.C., Echoes of the Ancient Skies, Harper & Row, Nueva York, 1983.

- Krupp E.C., En busca de las antiguas astronomías, Pirámide, Barcelona, 1989.

- Krupp E.C., Beyond the Blue Horizon, Oxford University Press, Oxford, 1991.

- McCluskey, S.C., Astronomies and cultures in early Medieval Europe. Cambridge University Press. Cambridge, 1998.

- Ruggles, C.L.N., "Whose equinox?" Archaeoastronomy 22:S45-50, 1999.

- Vogel, C., "Sol aequinoctialis. Problemes et technique de l'orientation dans le 15 culture chretien". Revue Sciences Religieuses36, 175-211, 1962.

